Versuche zur Messung des Wasserdampf- und Kohlendioxyd-Austausches über Pflanzenbeständen

Von

Bruno Huber

(Mit 8 Textfiguren)

(Vorgelegt in der Sitzung am 9. Mai 1946)

Einleitung

Unter den großen Naturforschern, bei denen zu lernen ich das Glück hatte, verdanke ich dem Wiener Meteorologen Wilhelm Schmidt besonders entscheidende und nachhaltige Anregungen. Später als Direktor der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik an die führende Stelle seines Faches in Österreich berufen, war er während meiner Assistentenzeit an der Hochschule für Bodenkultur in Wien noch Vorstand der Lehrkanzel für Meteorologie daselbst und entbehrte damit einen Schülerkreis eigentlicher Fachmeteorologen. Um so bereitwilliger teilte mir der geistsprühende und temperamentvolle Forscher von der Fülle der ihn bewegenden Probleme mit, sobald er meine einschlägigen Neigungen erkannt hatte. Ihm verdanke ich die Kenntnis des seither in der Botanik so beliebt gewordenen Piche-Evaporimeters, des Zeißschen Schleifengalvanometers, die erste Einführung in den Wärmehaushalt der Pflanzen und die Anregung zur thermoelektrischen Saftstrommessung.

Während diese Anregungen längst experimentelle Früchte gebracht haben, trug ich eine besonders wichtige Anregung jahrelang nur in Gedanken mit mir herum: die Möglichkeit, den Gaswechsel von Pflanzenbeständen durch Messung des Gasaustausches über ihnen zu bestimmen, von der W. Schmidt bereits 1917 zum erstenmal überschlägig Gebrauch gemacht hatte und deren Theorie er 1925 ausführlich entwickelte. Erst 1937 habe ich im Rahmen meines Vortrages über „Methoden, Ergebnisse und Probleme der neueren Baumphysiologie" die Botaniker öffentlich auf diese methodische Möglichkeit hingewiesen und anschließend einschlägige Vorversuche eingeleitet.

Inzwischen ist die angesichts der großen Fortschritte der Turbulenzforschung auf der Hand liegende Möglichkeit unter ausdrücklicher Berufung auf W. Schmidt auch von amerikanischer Seite aufgegriffen und von Thornthwaite und Holzman auf zwei amerikanischen Versuchsfarmen eine laufende Registrierung der Verdunstung in die Wege geleitet worden (vgl. meinen Bericht in: Fortschritte der Botanik *11*, 156; ob die angekündigten weiteren Veröffentlichungen erschienen sind, konnte ich leider trotz mannigfacher Bemühungen nicht erfahren). Das konnte für mich nur ein verstärkter Ansporn sein, die Entwicklung des Verfahrens auch unsererseits vorwärtszutreiben. Bedeutet es für mich doch eine persönliche Dankesschuld gegenüber meinem allzufrüh verstorbenen Lehrer, die Ausschöpfung dieses genialen Gedankengutes nicht allein dem Auslande zu überlassen. Auch praktisch besteht ein dringendes Bedürfnis nach Verfahren, die Wasserverbrauch und Stoffproduktion (CO_2-Assimilation) von Pflanzenbeständen laufend ohne störenden Eingriff zu verfolgen versprechen.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte die Versuche, welche, soweit als möglich, erst einmal behelfsmäßig mit vorhandenen Apparaturen durchgeführt wurden.

Nach verschiedenen Vorversuchen liefen die Hauptversuche von Mitte Juli bis Mitte September 1943. Obwohl auch diese Versuche in vieler Hinsicht ausbaubedürftig sind, sollen die dabei gewonnenen Erfahrungen schriftlich niedergelegt werden, da eine Wiederaufnahme der Versuche in absehbarer Zeit kaum möglich sein wird.

Grundgedanke des Verfahrens

Stellen wir uns einen gleichmäßigen Pflanzenbestand solcher Ausdehnung vor, daß die Luftschichtung unmittelbar über ihm nicht durch seitliche Einströmung gestört ist, so wird sich ein vertikales Feuchtigkeitsgefälle einstellen, das unter sonst gleichen Umständen um so steiler ist, je größer die Wasserdampfzufuhr von unten ist. Analoges gilt mit umgekehrten Vorzeichen für den CO_2-Gehalt der Luft, wenn dieses Gas der Luft durch die Assimilationstätigkeit eines Pflanzenbestandes entzogen wird. Das Gefälle allein ist aber kein ausreichendes Maß für die Größe dieses vertikalen Gasstromes, da es in noch viel höherem Maße von der stark wechselnden

turbulenten Durchmischung abhängt. Erst seit uns Wilhelm Schmidt im „Austauschkoeffizienten" A eine Maßzahl für diese Durchmischungsvorgänge an die Hand gegeben hat, bereitet die Messung des Gasstromes über Pflanzenbeständen keine grundsätzlichen Schwierigkeiten. Es gilt einfach die Gleichung

$$S = - A \, . \, s',$$

worin S die Stromstärke je Flächen- und Zeiteinheit, s' das Gefälle und A den Austauschkoeffizienten bedeutet, d. h. der Gasstrom (beispielsweise der Wasserdampf- oder Kohlendioxydstrom) entspricht dem Produkt aus Gefälle und Austausch.[1] Werden diese beiden im absoluten Maßsystem der Physiker (cm, g, sec) gemessen, so erhalten wir auch die Stromstärke in diesem Maß, das sich dann Botaniker, Land- und Forstwirte je nach Bedarf in anschaulichere Einheiten (mm Verdunstung pro Stunde oder Tag) umrechnen können.

Wir können bereits dieser Grundgleichung den für unsere Versuchsplanung wichtigen Hinweis entnehmen, daß bei einer bestimmten Stromstärke das Gefälle um so steiler wird, je kleiner der Austausch ist.

Wir können daher in der bodennahen Luftschicht bei kleinem Austausch mit verhältnismäßig großen und daher leichter meßbaren Gefällen rechnen. Während sich die wenigen bisherigen Auswertungen mit der Ermittlung der Verdunstung ganzer Länder aus dem durch Ballonaufstiege erfaßten Feuchtigkeitsgefälle mehrerer Kilometer begnügten und selbst Thornthwaite und Holzman ihre Meßstellen in 2 und 28 Fuß (ca. 0,6 und 8,5 m) Höhe über dem Boden einrichteten, bleibe ich, einer bereits von W. Schmidt selbst (1925, S. 52) gegebenen Anregung folgend, in der bodennahen Luftschicht (Vegetationsoberfläche und 1 m darüber). Die Beschränkung in der Vertikalen ist zugleich die Voraussetzung, um auch den Gaswechsel horizontal nicht allzu ausgedehnter Pflanzengesellschaften zu erfassen.

Bezüglich aller weiteren Einzelheiten muß auf die vorzüglich klaren Sammeldarstellungen vom W. Schmidt und

---

[1] Das negative Vorzeichen bedeutet, daß der Strom S aufwärts gerichtet ist, wenn der Gehalt aufwärts abnimmt.

neuerdings Lettau verwiesen werden. Wegen der praktischen Wichtigkeit sei nur noch hervorgehoben, daß alle vom Austausch erfaßten Stoff- und Energiegehalte in einem von Druck und Temperaturänderungen unabhängigen Maß angegeben werden müssen, also beispielsweise die absolute und nicht relative Feuchtigkeit.

Unsere praktische Aufgabe besteht also nunmehr darin: 1. das Wasserdampf-, 2. das CO_2-Gefälle und 3. den Austausch über den zu untersuchenden Pflanzenbeständen messend zu verfolgen. Zuvor sind aber noch einige Angaben über das Versuchsgelände erforderlich.

Methodische Vorbemerkungen: Versuchsgelände, Arbeitseinteilung

Um bei der Messung des vertikalen Gasstromes zu Mittelwerten zu kommen, welche außerhalb der zeitlichen und räum-

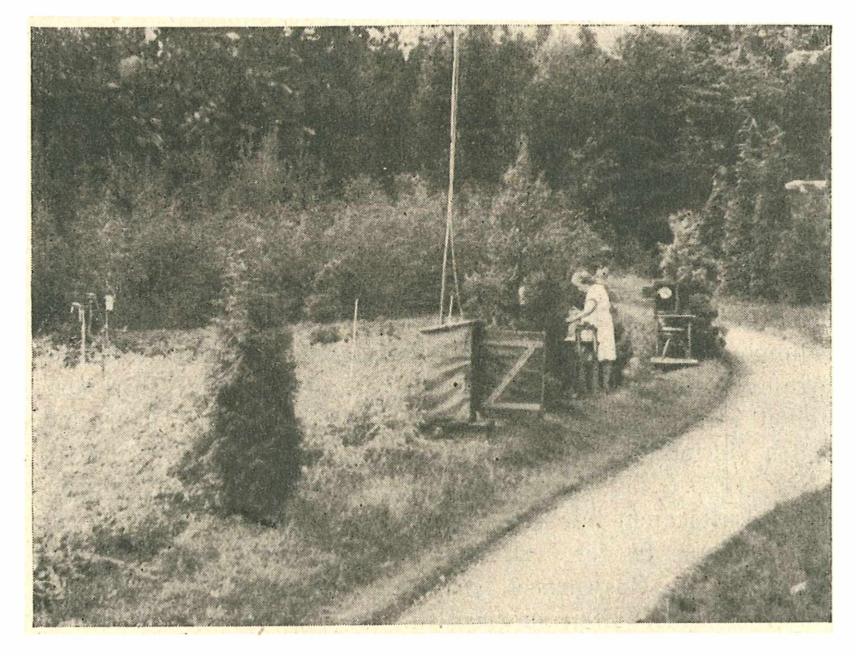


Abb. 1. Versuchsgelände im Tharandter Forstgarten.

In der Mitte des Kartoffelfeldes das Geslände mit den Absorptionsröhren usw. (vgl Detailbild; Abb 2), am Wegrand hintereinander Multithermograph (in der Hütte: Assimilationsapparatur und Transpirationswaage); hinter der Thermographenhütte Mast zum Ansaugen von Luftproben aus 5 Höhe.

lichen Größe der einzelnen „Turbulenzelemente“ (Luftwirbel, Böen) liegen, erstreckt sich jede Einzelbestimmung über einen Zeitraum von mehreren Minuten bis zu einer Stunde. Ebenso wäre es wünschenswert, die Untersuchungen in einem gleichmäßigen, ebenen Pflanzenbestand möglichst großer Ausdehnung vorzunehmen. Solange darüber keine näheren Erfahrungen vorliegen, würde ich zunächst fordern, daß die horizontale Ausdehnung des Bestandes einigermaßen der horizontalen Windgeschwindigkeit während der Versuchsdauer entspricht, also einige hundert Meter beträgt. Die unten, Seite 133, mitgeteilten Berechnungen machen es allerdings wahrscheinlich, daß bereits ein kleinerer Ausströmweg genügt, um der herangeführten Fremdluft den für die Versuchsfläche typischen Wasserdampf- und CO_2-Gehalt zu verleihen; das wird besonders dann gelten, wenn auch die Umgebung einen ähnlichen Gaswechsel aufweist

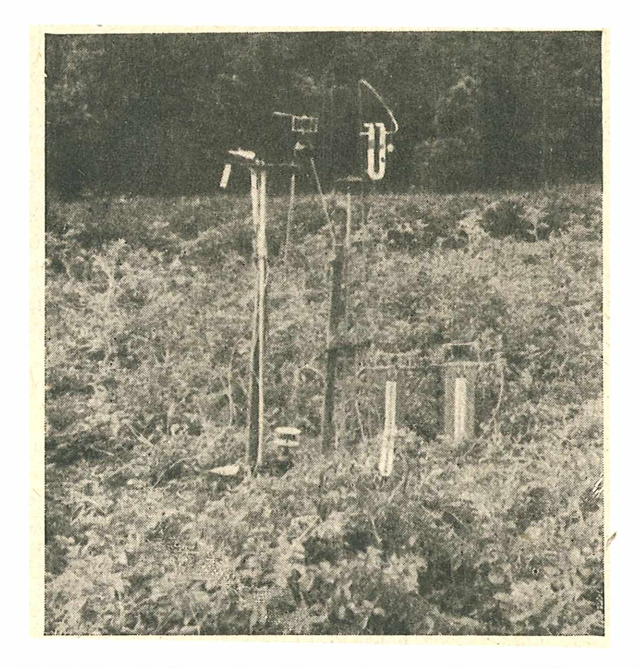


Abb. 2. Meßstelle mit Absorptionsröhren, Anemometern und Thermoelement-Psychrometern unter Budig-Schirmen in 50 und 150 cm Höhe.
Im Kartoffelkraut die beiden Strömungsmesser zur Überwachung der angesogenen Luftmengen.

wie die Versuchsfläche selbst. Endgültig können darüber nur Versuche entscheiden.

Leider war nun im gebirgigen und kleinparzellierten Gelände Tharandts eine ebene, gleichmäßig bestandene Fläche von auch nur hundert Metern im Geviert nicht auffindbar. Die Frage, ob unter diesen Umständen die Versuche von vornherein auswärts eingeleitet werden sollten (ich dachte an das Elbtal in Pillnitz) oder man zunächst die örtlichen Unvollkommenheiten Tharandts in Kauf nehmen sollte, mußte während des Krieges zugunsten Tharandts entschieden werden. Ich begann die Vorversuche auf dem 20×50 m großen Rasenplatz hinter dem Cottabau. Sobald jedoch neben dem Wasserdampf- auch das CO_2-Gefälle in die Untersuchung einbezogen wurde, mußte auch das von der Eisenbahn durchzogene enge Tal verlassen werden. Ich wählte für die Hauptversuche im obersten Teil des Forstgartens ein leidlich ebenes (schwach nach Südost geneigtes) Gelände mit einem Kartoffelfeld von 10×10 m Ausdehnung, in dessen Mitte ein Wasserleitungsanschluß verlegt wurde (Wasserstrahlpumpe). Der Aufbau der Apparaturen, deren Einzelheiten später geschildert werden, erfolgte möglichst außerhalb der Fläche, während die eigentliche Meßstelle in der Mitte höchstens stündlich zum Wechsel der Chlorkalziumröhrchen und Ablesung der Anemometer immer durch dieselbe Ackerfurche betreten wurde (Abb. 1. und 2).

Sobald die Versuche einigermaßen liefen, unterstützten mich mehrere Hilfskräfte in der Wartung, und zwar übernahm Frl. L. März die Wasserdampf- und Transpirationsbestimmung sowie die Ablesung der Anemometer. Frl. cand. rer. nat. H. Kräusel die Wartung des Multithermographen mit den Thermoelement-Psychrometern sowie die Kontrollmessungen mit dem Assmannschen Aspirationspsychrometer, während Frl. H. Bethe und cand. rer. nat. U. Dick gemeinsam die besonders heikle Bestimmung des CO_2-Gefälles sowie der Assimilation besorgten. Ich danke auch an dieser Stelle allen Beteiligten für ihre Gewissenhaftigkeit und Ausdauer bei den vom Morgengrauen bis in die Abendstunden laufenden Versuchen.

1. Messung des Feuchtigkeitsgefälles durch Absorption mit Chlorkalzium

Die Bestimmung der spezifischen Feuchtigkeit (Gramm Wasserdampf im Gramm Luft) erfolgte, wie üblich, zunächst

durch Absorption in trockenem Chlorkalzium. Ich zog diese unmittelbare Bestimmung der gesuchten Größe schon aus Gründen empirischer Anschaulichkeit mindestens für den Anfang der Berechnung aus irgendwelchen Feuchtigkeitsregistrierungen vor, wählte sie aber auch deshalb, weil ich im selben Arbeitsgang auch den Kohlendioxydgehalt der Luft gravimetrisch (durch Absorption in Natronkalk) zu bestimmen beabsichtigte.

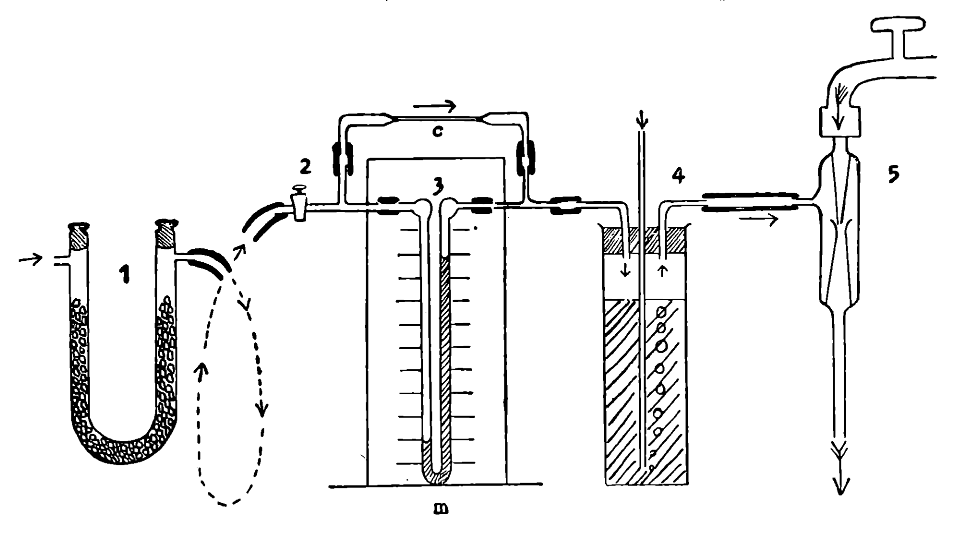


Abb. 3. Schema der Versuchsordnung bei der Bestimmung der spezifischen Feuchtigkeit.

1. Absorptionsröhre mit Chlorkalzium. 2. Hahn zur Regelung des Gasstromes. 3. Riesenfeldscher Strömungsmesser mit Bremskapillare *c* und Manometer *m*. 4. Mariottsche Flasche zur Regelung der Saughöhe. 5. Wasserstrahlpumpe; der Weg des Luftstromes ist durch einfache, der des Wasserstrahles durch gefiederte Pfeile bezeichnet.

Zur Durchführung der Bestimmung (Abb. 3) wurde ein schwacher Luftstrom mittels Wasserstrahlpumpe angesogen. Da diese stoßweise und ungleichmäßig arbeitet, sorgte eine Mariottsche Flasche für konstante Saughöhe von ca. 20 cm Wasserdruck: Bei dieser Saughöhe läßt nämlich die als Ventil in Wasser tauchende Glasröhre Außenluft eintreten und verhindert damit weiteren Druckanstieg. Die Stärke der auf diese Weise erzielten Durchströmung wurde an Riesenfeldschen Strömungsmessern (Lieferfirma Hugershoff, Leipzig) abgelesen.

Diese zwingen den Luftstrom, durch auswechselbare, geeichte Bremskapillaren zu treten, wobei sich im parallelgeschalteten Wassermanometer eine der Stromstärke entsprechende ablesbare Druckhöhe einstellt. Die von mir bisher verwendeten Bremskapillaren, Modell VI, lassen bei 100 mm Wasserdruck je Minute einen halben Liter Luft passieren, es lassen sich im Bedarfsfall mit engeren Kapillaren auch zehn- und hundertmal schwächere Luftströme ansaugen. Da es sich für uns darum handelt, aus zwei Meßhöhen Parallelproben anzusaugen, und die Schlauchleitungen und Absorptionsröhren stets etwas verschiedene Widerstände aufweisen, wurde das Ansaugen jeder Luftprobe durch einen eigenen Strömungsmesser überwacht und durch eingeschaltete Glashähne für genau gleiche Durchströmung gesorgt. Als Absorptionsröhren dienten U-Röhren mit 13 cm langen Schenkeln, die durch eingeschliffene Glasstopfen rasch und verläßlich verschließbar waren. Sie wurden mit 30—40 g Calciumchlorid trocken, feinkörnig, zur Analyse (Merck Nr. 2081 f) beschickt.

Als erstes Beispiel einer solchen Messung gebe ich in Abb. 4 die stündliche Absorption der beiden Chlorkalziumröhren vom 19. Juli 1943 wieder: Sie beginnt 5 Uhr morgens (wie alle weiteren Zeitangaben mitteleuropäische Sommerzeit, also eine Stunde vor der Normalzeit) bei beiden Röhren mit einer fast gleichen Absorption von rund 360 mg/h, steigt bei der zweiten Messung (7—8 Uhr) an, wohl deswegen, weil sich der absolute Wasserdampfgehalt der Luft infolge Wiederaufnahme des bei der ersten Messung noch niedergeschlagenen Taues angereichert hat, sinkt aber dann während der Mittagsstunden deutlich ab (Zufuhr trokkenerer Höhenluft während der Mittagsturbulenz), um abends wieder anzusteigen. Ein Gefälle im Wasserdampfgehalt fehlt während der ersten Morgenmessung (der Wasserdampfgehalt der unteren Meßstelle ist bei Tauniederschlag, wie theoretisch zu erwarten, sogar vielfach gegenüber dem der oberen Meßstelle deutlich, wenn auch nur wenig erniedrigt, so daß ein schwaches Gefälle bodenwärts besteht); bei der zweiten Messung ist dagegen bereits ein aufwärts gerichtetes Gefälle angedeutet (obere Meßstelle trockener), von der dritten Messung (9—10 Uhr)

an beträgt es rund 10%, eine Größenordnung, die außerhalb der Zeit der Mittagsturbulenz bei den meisten Messungen wiederkehrt und als typisch gelten kann; noch stärker wird das Gefälle nach Sonnenuntergang, wenn sich die stabile bodennahe Kaltlufthaut mit Transpirationswasser anreichert, ohne es beim Abklingen der Austauschvorgänge nennenswert an höhere

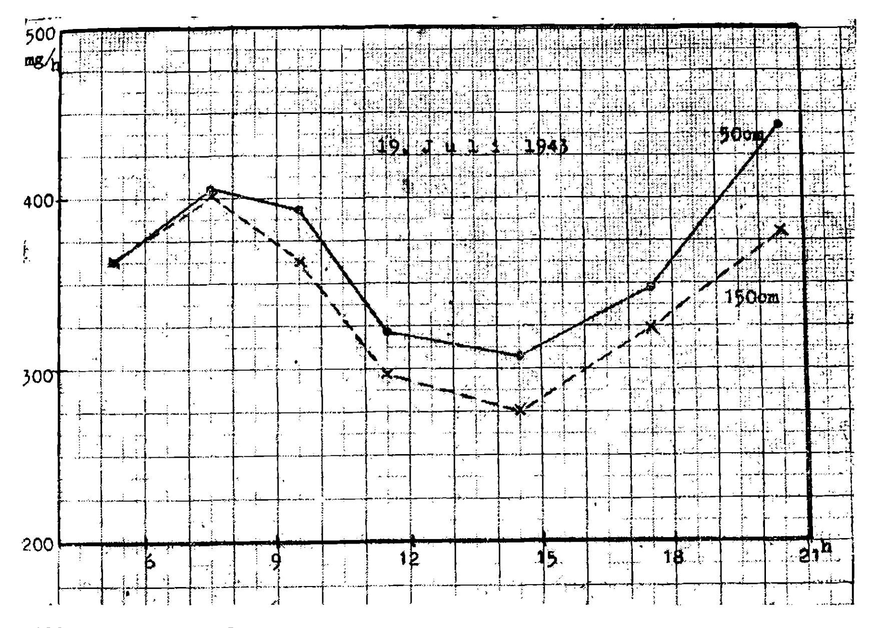


Abb. 4. Tagesgang der Gewichtszunahme der Chlorkalziumröhren in beiden Meßhöhen (50 und 150 cm) am 19. Juli 1943.
mg/h = Milligramm je Stunde.

Luftschichten weiterzugeben. Auch nach Regen und besonders künstlicher Bewässerung konnten noch erheblich steilere Feuchtigkeitsgefälle beobachtet werden.

Bei den weiteren Erörterungen geben wir nun nicht mehr unmittelbar die Absorption der Chlorkalziumröhren, sondern den daraus berechneten Wasserdampfgehalt der Luft an, der sich aus den gleichzeitigen Ablesungen der Strömungsmesser zunächst ohne weiteres für den Liter Luft ergibt, z. B. bei einer stündlichen Absorption von 300 mg und einer Durchströmung

von 30 Litern zu 10 mg/l. Der Physiker zieht jedoch mit gutem Grunde eine Angabe des Wasserdampfgehaltes je Gramm Luft vor, und zwar nicht deswegen, weil diese Angabe Gramm pro Gramm eine dimensionslose (unbenannte) Zahl liefert, sondern weil diese gewichtsbezogenen im Gegensatz zu den volumbezogenen Gehaltsangaben temperaturunabhängig sind, was auch für unseren Vergleich verschieden temperierter Schichten entscheidend wichtig ist. Freilich bedeutet die Forderung, bei der Berechnung der Gehaltsangaben der mit der Temperatur wechselnden Dichte der Luft Rechnung zu tragen, eine große Mehrarbeit. Da jedoch die Änderung der Dichte je Grad nur $^1/_{273}$, für 10° also nur rund 4% ausmacht, gehen wir so vor, daß wir zunächst einheitlich mit einer mittleren Dichte der Luft von 1,2 g je Liter rechnen und erst nachträglich von Fall zu Fall erörtern, wieweit die Temperaturunterschiede der beiden Meßstellen eine Korrektur erforderlich machen. Dazu kann gleich hier bemerkt werden, daß ein Wasserdampfgefälle (50—150 cm) von 10%, wie es während der Tagesstunden als typisch gelten kann, erst durch eine Temperatur**zunahme** von 27° vorgetäuscht werden könnte; da aber tagsüber die Temperatur aufwärts abnimmt, könnte der Temperatureinfluß überhaupt nur einen vertikalen Anstieg des Wasserdampfgehaltes vortäuschen; eine vertikale Abnahme kann durch ihn höchstens verringert werden.

Nach diesen Vorbemerkungen geben wir nebenstehend in Tabelle 1 unsere weiteren Meßergebnisse in wochen-, bzw. dekadenweiser Zusammenfassung.

Da die Versuche unter mancherlei Kinderkrankheiten litten, die nicht in jedem Falle erkannt und vermerkt wurden (z. B. wurden die von mir ursprünglich ausgesuchten und in Blindversuchen auf genau gleichen Gang geprüften Absorptionsröhrchen infolge Bruch zum Teil gegen weniger gut übereinstimmende ausgetauscht), möchte ich die wiedergegebenen Zahlen vorläufig mehr orientierend gewertet wissen. In ihrer übereinstimmenden Tendenz lehren sie zunächst folgendes:

1. Vor bis kurz nach Sonnenaufgang finden sich sehr schwache Gefälle wechselnden Vorzeichens, bei Tauniederschlag verhältnismäßig häufig die theoretisch zu erwartenden positiven

Tabelle 1.

Mittelwerte und Streuung der Wasserdampfgehalte und Wasserdampfgefälle.

A. Wasserdampfgehalte der oberen Meßstelle (150 cm) in 10^{-3} g/g, die Dichte der Luft einheitlich mit 1,2 g/l angenommen (keine Temperaturkorrektur).

15. bis 22. 7.	12,2 (11,2—14,4)	11,6 (9,0—12,6)	11,5 (10,0—12,5)	10,3 (8,5—14,0)	11,0 (7,4—14,9)	8,6 (4,7—12,9)	9,9 (9,8—9,9)	11,3 (7,9—14,7)
23. bis 30. 7.	12,2 (9,8—15,2)	11,8 (10,8—13,0)	10,1 (7,5—13,1)	7,2 (2,7—9,4)	6,2 (3,7—8,0)	6,0 (2,6—8,3)	—	8,4 (5,8—13,0)
2. bis 10. 8.	10,9 (8,2—13,3)	—	10,6 (6,5—15,5)	7,5 (6,9—11,9)	5,4 (3,5—8,3)	5,7 (2,9—6,8)	—	—
11. bis 20. 8.	9,8 (7,8—11,5)	—	10,5 (7,7—13,4)	8,7 (6,2—12,2)	7,9 (3,7—11,7)	7,2 (3,5—13,2)	—	—
23. bis 31. 8.	12,6 (11,5—13,4)	—	13,9 (10,9—12,7)	10,2 (8,9—13,2)	8,6 (7,4—10,2)	8,2 (6,6—9,4)	—	—
1. bis 17. 9.	12,6 (8,9—15,6)	—	11,2 (9,7 - 12,1)	11,0 (8,1—12,5)	9,0 (7,4—11,9)	10,3 (7,3—13,8)	—	—

B. Wasserdampfgefälle 50—150 cm in 10^{-5} cm^{-1} (d. h. wegen Umrechnung auf 1 cm ein Hundertstel des Unterschiedes der in 50 und 150 cm Höhe gemessenen Wasserdampfgehalte); die Zahlen ohne Vorzeichen bedeuten aufwärts abnehmenden Gehalt; vertikale Zunahmen sind durch ein vorgesetztes + gekennzeichnet; keine Temperaturkorrektur.

15. bis 22. 7.	+ 0,2 (+1,2 bis—0,5)	0,5 (+0,2 bis—1,2)	0,6 (0,2 bis 0,9)	0,8 (+0,3 bis—2,8)	+ 0,04 (+1,7 bis—1,7)	0,5 (+0,6 bis -1,7)	1,0 (0,8 bis 1,2)	1,3 (0,5 bis 2,0)
23. bis 30. 7.	0,8 (0,3 bis 1,3)	1,2 (0,1 bis 1,9)	1,1 (0,7 bis 1,4)	0,6 (0,2 bis 0,8)	+ 0,03 (+0,5 bis—0,3)	2,2 (0,5 bis 4,9)	—	1,8 (0,0 bis 2,5)
2. bis 10. 8.	0,3 (+0,1 bis—0,6)	—	1,2 (0,4 bis 2,5)	+ 0,4 (+0,9 bis—0,2)	+ 0,2 (+0,8 bis—0,3)	+ 0,3 (+0,7 bis—0,1)	—	—
11. bis 20. 8.	+ 0,2 (+1,0 bis—0,5)	—	0,9 (0,2 bis 1,7)	0,3 (+0,3 bis—1,1)	0,1 (+0,8 bis—0,5)	0,1 (+1,7 bis—2,1 ?)	—	—
23. bis 31. 8.	+0,03 (+0,1 bis—0,1)	—	0,5 (0,2 bis 0,9)	+ 0,2 (+0,8 bis—0,2)	+ 0,5 (+1,0 bis—0,1)	+ 0,6 (+1,4 bis—0,1)	—	—
1. bis 17. 9.	0,3 (+0,4 bis—0,6)	—	0,1 (+0,4 bis—0,9)	0,1 (+0,7 bis—0,6)	+ 0,7 (+1,5 bis—0,4)	0,7 (+0,4 bis 1,7)	—	—

Gefälle (Anstieg nach oben), die einen bodenwärts gerichteten Kondensationsstrom erweisen. Da zu dieser Zeit die dichtere Kaltluft am Boden lagert, kann die Erscheinung nicht durch die Temperaturverhältnisse vorgetäuscht sein; die Temperaturkorrektur muß den Effekt im Gegenteil verstärken.

2. In den Vormittagsstunden pflegt das nunmehr eindeutig negative Gefälle (vertikale Feuchtigkeitsabnahme) ein erstes Maximum zu erreichen, das — wie vorgreifend bemerkt sein mag — auf dem vormittägigen Transpirationsmaximum einerseits, aber auch der noch geringen Turbulenz anderseits beruht.

3. Wenn in den Mittags- und frühen Nachmittagsstunden die instabile Temperaturschichtung (Erhitzung der Bodenoberfläche) zu der bekannten Belebung der thermischen Turbulenz führt, wird das Feuchtigkeitsgefälle in den meisten Fällen wieder stark verwischt. Daß es dabei verhältnismäßig oft sogar das Vorzeichen wechselt, kam uns überraschend, denn Geiger (1941, S. 91) „ist kein Fall bekannt, in dem nicht tagsüber der Naßtyp (d. i. Feuchtigkeitsabnahme nach oben) vorherrschte“. Wohl aber zeigt auch seine Abb. 46 die Verwischung des Dampfdruckgefälles zwischen 12 und 14 Uhr. Die Mehrzahl der von uns beobachteten Fälle einer basalen Wasserdampfabnahme beruht zweifellos auf der Dichteabnahme der erhitzten Bodenluft und scheidet daher aus, sobald wir eine entsprechende Temperaturkorrektur anbringen; da aber vereinzelt positive Gefälle um die Mittagsstunden auch bei der psychrometrischen Feuchtigkeitsregistrierung und sogar bei den Messungen mit dem Assmannschen Aspirations-Psychrometer gemessen wurden (vgl. folgendes Kapitel), bin ich nicht sicher, ob diese Erklärung allein ausreicht oder ob nicht doch unter bestimmten Umständen Wasserdampfkondensationen im erhitzten Boden vorkommen.

Da wir uns bei diesen schwachen Gefällen in der Nähe der Fehlergrenze bewegen, kann die Frage des Vorkommens bodenwärts gerichteter Feuchtigkeitsgefälle um die Mittagszeit nur durch erneute, besonders auf diesen Punkt gerichtete Untersuchungen entschieden werden, die unter genauerer Kontrolle der Meßgenauigkeit vorzunehmen sind.

Der Zeitpunkt, in dem sich das Vormittagsgefälle verwischt, wird bei großer Trockenheit deutlich vorverlegt (11—12 Uhr statt 14—15 Uhr), was mehr auf Transpirationseinschränkung als auf früherem Eintritt der Mittagsturbulenz beruhen dürfte.

4. In den späteren Nachmittagsstunden bildet sich erneut ein deutliches Feuchtigkeitsgefälle heraus, das analog dem Vormittagsmaximum auf dem Zusammenwirken nochmals ansteigender Transpiration und abnehmenden Austausches beruht. Es erreicht sogar während der Windruhe nach Sonnenuntergang besonders hohe Beträge.[1] Leider konnten diese aufschlußreichen Abendmessungen nach der Übertragung der Beobachtungen an Hilfskräfte nicht mehr fortgeführt werden.

Im Gang des absoluten Wasserdampfgehaltes (der spezifischen Feuchtigkeit) kommt es über die in Abb. 4 wiedergegebene Mittagsdepression hinaus an sehr trockenen Tagen zu einem unwahrscheinlich starken und nachhaltigen Absinken der Werte (bis $2{,}6 \cdot 10^{-3}$).[2] Diese stehen in Widerspruch zu den anschließend zu besprechenden psychrometrischen Bestimmungen. An den drei Tagen, an denen die Chlorkalziummethode Mindestgehalte von 2,6, 2,7 und $2{,}9 \cdot 10^{-3}$ ergab (24. und 27. Juli, 2. August), zeigte das Assmannsche Aspirationspsychrometer in 1,5 m Höhe um 14 Uhr Psychrometerdifferenzen von 10,3° (26,1—15,8), 12,5° (30,0—17,5) und 14,5° (34,9—20,4), entsprechend Dampfdrucken von 8,2, 8,7 und 10,6 mm (rel. Feuchtigkeit 33%, 27% und 25%). Da, wie im nächsten Abschnitt näher ausgeführt wird, der Wassergehalt in mg/g rund 85% des Dampfdruckes in Millimetern beträgt, sank der Wasserdampfgehalt in keinem Falle unter etwa $7 \cdot 10^{-3}$. Die Absorption durch Chlor-

[1] Der einmalige Höchstwert im Gefälle von $4{,}9 \cdot 10^{-5}\,cm^{-1}$ wurde nach künstlicher Bewässerung bei sehr trockener Luft gemessen; der höchste natürliche Gefällewert betrug 2,2.

[2] Außer Betracht bleiben dabei Fehlbestimmungen, bei denen infolge Platzens der Schlauchleitungen Nebenluft unter Umgehung der Absorptionsröhren angesogen wurde; sie werden in der Regel sofort erkannt, da sie im allgemeinen nur eine der beiden Meßstellen betreffen; nachdem sie vorgekommen waren, vergewisserten wir uns weiterhin am Anfang und am Ende jeder Bestimmung durch kurzen Verschluß der Absorptionsröhrchen, daß keinerlei Nebenluft vorhanden ist (sofortiger Rückgang der Manometer in den Strömungsmessern auf Null).

kalzium scheint demnach gegenüber sehr trocken heißer Luft unzureichend, mindestens wenn man, wie wir es taten, während des ganzen Tages ohne Neufüllung mit demselben Röhrchen arbeitet. Es besteht sogar der Verdacht, daß dieser Effekt an der scheinbaren mittäglichen Umkehr des Feuchtigkeitsgefälles beteiligt sein könnte, da das Röhrchen der unteren Meßstelle infolge der vorangegangenen stärkeren Absorption in seinem Absorptionsvermögen gegenüber der trokkenen Mittagsluft stärker beeinträchtigt sein könnte.

Merkwürdigerweise gelang es nicht, ein unzureichendes Absorptionsvermögen des Chlorkalziums gegenüber der Luft von 30 % rel. Feuchtigkeit zu erweisen, wenn in Laboratoriumsversuchen die eintretende Luft abwechselnd durch Wasser (100 % rel. Feuchtigkeit) und 50 %ige Schwefelsäure geleitet wurde. Trotzdem würde ich bei weiteren Versuchen mit dieser Methode zum mindesten als Kontrollversuch um die Mittagszeit frische Chlorkalziumröhrchen oder noch schärfere Absorbentien verwenden. Wahrscheinlich aber wird man sich von der zwar unmittelbar anschaulichen, aber doch recht umständlichen Absorptionsmethode überhaupt abwenden und weiterhin zu der viel eleganteren psychrometrischen Feuchtigkeitsregistrierung übergehen, mit der wir uns nunmehr näher beschäftigen wollen.

2. Feuchtigkeitsregistrierung mit Thermoelement-Psychrometern

Da schon im Hinblick auf die thermische Komponente des Austausches eine Kenntnis des Temperaturganges unserer beiden Meßstellen wünschenswert war, nahm ich beim Aufbau der Versuchsanordnung auch unseren thermoelektrischen Multithermographen von Hartmann & Braun (Huber 1937) wieder in Betrieb. Dabei lag es nahe, die freien Thermoelemente zur Registrierung der Temperatur des feuchten Thermometers zu verwenden und damit allmählich auf eine psychrometrische Feuchtigkeitsbestimmung an Stelle der gravimetrischen zuzukommen. Der Vorteil einer solchen liegt auf der Hand, weil der Multithermograph mit einem geringen Aufwand an menschlicher Wartung der späteren Auswertung lückenlose Aufzeich-

nungen liefert, wie sie der größte Bienenfleiß nicht beschaffen könnte. Außerdem vermeidet er den störenden Eingriff in Schichtung und Turbulenz der untersuchten bodennahen Schichten, den auch eine schwache Aspiration immerhin mit sich bringt (wir werden darauf bei der Messung des CO_2-Gefälles noch näher eingehen müssen). Bedenken bereitete nur der Umstand, daß die Thermoelement-Psychrometer in verschiedenen Höhen über dem Boden einer systematisch verschiedenen Belüftung ausgesetzt sind. Um Anhaltspunkte für den dadurch bedingten Fehler zu gewinnen, hat Frl. H. Kräusel, die den Sechsfarbenschreiber wartete, täglich zweimal (8 und 14 Uhr) die Psychrometerdifferenz in beiden Meßhöhen auch mit dem Assmannschen Aspirationspsychrometer gemessen.

Registriert wurde für beide Meßhöhen (50 und 150 cm) nicht die Psychrometerdifferenz, was mit Thermoelementen an sich möglich wäre, sondern die Temperatur sowohl einer trockenen wie einer feuchten Thermonadel (zweite Lötstelle in Thermosflasche mit Eiswasser). Die Wasserversorgung der feuchten Elemente erfolgte aus einem täglich nachgefüllten Reagensglas durch einen Wattedocht, der auf mehrere Zentimeter Länge um die Zuleitungsdrähte bis zur Lötstelle führte, so daß Fehler durch Wärmeleitung verläßlich ausgeschaltet waren. Trockene und feuchte Elemente lagen 2—3 cm nebeneinander unter einem Budigschirm (Zinkblechscheibe von 10 cm Durchmesser) als Strahlungsschutz. Der massive Budigschirm, der erst nach einigen Tagen angebracht wurde, hatte durch Bremsung der senkrechten Luftschlieren einen deutlich dämpfenden Einfluß auf die Streuung des Temperaturbandes. Ich ließ daher neue Budigschirme anfertigen, bei welchen das Schutzblech durch drei schräg aufgebogene Schlitze jalousieartig durchbrochen ist und dem vertikalen Austausch einen gewissen Durchtritt ermöglicht. Die Schirme kamen jedoch bei den Messungen dieser Vegetationsperiode nicht mehr in Anwendung. Die Thermoelemente besaßen 10 m lange Leitungen, so daß das Schreibgerät außerhalb des Kartoffelfeldes aufgestellt werden konnte und das Mikroklima der Meßstellen in keiner Weise störte.

Die Thermographenkurven veranschaulichen nun aufs sinnfälligste die im vorigen Kapitel aus den Absorptionsversuchen hergeleiteten Gesetzmäßigkeiten. Wir müssen uns begnügen, als ein Beispiel für viele ähnliche in Abb. 5 die Aufschreibungen vom 29. Juli 1943 wiederzugeben. Um die im Original durch Farben unterschiedenen Temperaturbänder in der Schwarz-Weiß-Wiedergabe leichter lesbar zu machen (die blauen und violetten Meßpunkte kommen photographisch schlecht heraus), habe ich in

die Bänder der unteren Meßstelle (50 cm) bei jeder Halbstunden-Ordinate einen Ring, in die der oberen (150 cm) ein Kreuz eingetragen, und zwar sowohl in die des trockenen (obere Kurve) wie die des feuchten Thermoelements (untere Kurve). Wir wollen sie bei den folgenden Erörterungen kurz t_{I} und t_{II} (trockene Temperatur der unteren und oberen Meßstelle), bzw. f_{I} und f_{II} (feuchte Temperatur der beiden Meßstellen) heißen. Den ganzen Tageslauf habe ich durch die senkrechten Striche A—E' in bezeichnende Abschnitte zerlegt:

Während der frühen Morgenstunden laufen die bis über Mitternacht schwach, aber deutlich getrennten Kurven t_{I} und f_{I} zusammen, d. h. es tritt im Niveau der Kartoffelblattflächen Wasserdampf-Sättigung und im Gefolge Taubildung ein (Taupunkt rund 10° entsprechend einer Wasserdampfspannung $e = 9{,}18$ mm). Auch f_{II} läuft mit den beiden anderen Kurven, während t_{II} fast 3° höher bleibt, d. h. in dieser milden und verhältnismäßig trockenen Nacht bleibt die Taubildung auf die bodennächste Luftschicht beschränkt, während bereits in 150 cm Höhe ein beträchtliches Sättigungsdefizit besteht und damit das Dampfdruckgefälle aufwärts gerichtet bleibt. In anderen Fällen kommt es aber auch in 150 cm Höhe zu einem Zusammenlaufen der t- und f-Kurven, wobei der 1—2° höheren Lage dieser Kurven ein höherer Sättigungsdruck und damit ein bodenwärts gerichtetes Gefälle (Kondensationsstrom) entspricht.

Um 6 Uhr morgens (mitteleuropäischer Sommerzeit) bei Strich A beginnt sich t_{I} von f_{I} zu entfernen und der Kurve t_{II} zu nähern, die es 7.30 Uhr (B) erreicht und kurz vor 8.30 Uhr (B') endgültig überholt: Die trockene Temperatur der bodennächsten Luftschicht liegt nun über der höherer Schichten (Übergang vom Ausstrahlungs- zum Einstrahlungstyp Geigers). Die Temperaturbänder, namentlich der trockenen Lötstellen, werden unruhig (zunehmende Turbulenz), obschon die Schwankungen infolge der Bremswirkung der Budigschirme gegenüber den (hier nicht wiedergegebenen) Kurven der Vorwoche deutlich gedämpft erscheinen.

Im Gefolge des Anstieges von t_{I} hat sich auch f_{I} von f_{II} gelöst und liegt bis 11.30 Uhr (C) etwa 2° höher; da der Unter-

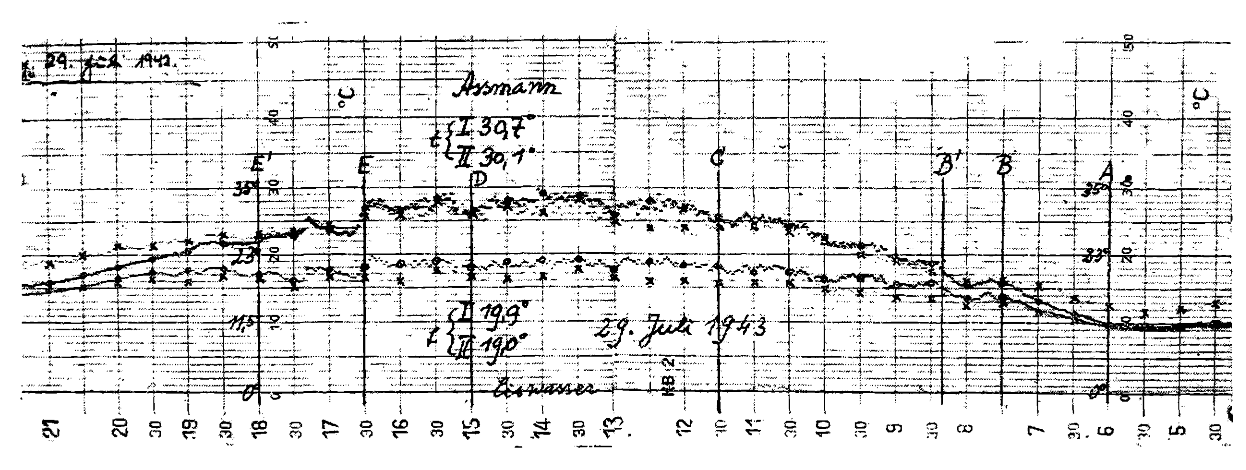


Abb. Photo der Originalaufzeichnung des Sechsfarbenschreibers vom 29. Juli 1943.

Trockene und feuchte Temperaturen der unteren (Ringe) und oberen Meßstelle (Kreuze); Kontroll-Lötstelle in Eiswasser. Der Eichwert hat sich gegenüber dem Papiervordruck auf 1,15° je Skalenteil erhöht (mit Tinte eingetragene Ordinatenbeträge). Weitere Erklärung im Text.

schied zwischen t_I und t_{II} deutlich geringer ist, (im allgemeinen zu dieser Zeit noch nicht über 1°), ergeben sich für die obere Meßstelle deutlich höhere Psychrometerdifferenzen und damit ein vertikales Dampfdruckgefälle; am eindeutigsten für den Abschnitt BB', in dem die Kurven t_I und t_{II} praktisch zusammenlaufen, während f_{II} etwa 1° unter f_I liegt.

Für die heißesten Mittagsstunden, 11.30 Uhr bis 15.00 Uhr (C—D), mit ihrer starken Temperaturunruhe der trockenen Lötstellen wird die Frage des Feuchtigkeitsgefälles in völligem Einklang mit den Chlorkalzium-Bestimmungen unsicher. Soweit sich das bei der Streubreite der Temperaturbänder nach Augenmaß beurteilen läßt, liegt t_{II} durchschnittlich ungefähr ebenso weit unter t_I wie f_{II} unter f_I; das Feuchtigkeitsgefälle scheint verschwunden.

Bei der zahlenmäßigen Auswertung (s. u.) bestätigt sich dieser erste Eindruck allerdings nicht, da der gleichen Psychrometerdifferenz bei höheren Temperaturen ein nicht unbeträchtlich höherer Dampfdruck zugeordnet ist und daher nach wie vor ein deutliches Gefälle erhalten bleibt, z. B. 14—14.30: $t_I - f_I = 32{,}2 - 21{,}2 = 11{,}0°$; entsprechender Dampfdruck $e_I = 13{,}2$ mm; $t_{II} - f_{II} = 29{,}7 - 18{,}7 = 11{,}0°$; Dampfdruck $e_{II} = 10{,}7$ mm; Dampfdruckgefälle $e_{II} - e_I = -2{,}5$ mm.

Ab 15 Uhr (D) bilden sich wieder einigermaßen dem Vormittag entsprechende Verhältnisse aus: t_I und t_{II} rücken wieder so nahe zusammen, daß der nach wie vor deutliche Unterschied zwischen f_I und f_{II} ein vertikales Feuchtigkeitsgefälle veranschaulicht, besonders wenn infolge der leichten Ostlage der Versuchsfläche ab 16.30 Uhr (E) t_I wieder unter t_{II} sinkt (Übergang zum Ausstrahlungstyp Geigers).

Wenn nach 18 Uhr (E') in der ruhigen abendlichen Kaltlufthaut t_I auf f_I sich rasch nähern, es also zu einer starken Wasserdampfanreicherung in der bodennächsten Luftschicht kommt, während die Psychrometerdifferenz der oberen Meßstelle noch lange auf beachtlicher Höhe bleibt, erreicht das Feuchtigkeitsgefälle jene Höchstwerte, denen wir auch bei den Absorptionsmessungen begegnet sind.

Wollen wir den Vergleich zwischen den Absorptions- und Psychrometerbestimmungen über den allgemeinen Verlauf hinaus im einzelnen zahlenmäßig durchführen, so bedürfen die Thermographenkurven einer umständlichen Auswertung: Man kann entweder t auf f und damit die Psychrometerdifferenz für unmittelbar aufeinanderfolgende Punkte ablesen oder — was ich vorziehe — für halb- oder ganzstündliche Intervalle die mittlere Temperatur sowohl des trockenen wie des feuchten Thermometers bestimmen; da hiefür stündlich je 30 auf Zehntelgrade ablesbare Einzelpunkte zur Verfügung stehen, kann man zu sehr genauen Mittelwerten kommen. Wir haben uns vorläufig mit einer mehr überschlägigen Bestimmung begnügt, indem nach Augenmaß die mittlere Höhe des einstündigen Kurvenabschnittes auf Zehntelgrade schätzten.

Auf Grund der Temperatur des trockenen und des feuchten Thermometers läßt sich aus den Psychrometertafeln der Dampfdruck e in Millimetern ablesen.[1] Aus den Dampfdrucken e_{I} und e_{II} der beiden Meßstellen ergibt sich als Differenz das Dampfdruckgefälle 50—150 cm.

Zwischen diesen psychrometrisch ermittelten Dampfdrucken, bzw. Dampfdruckgefällen und den spezifischen Feuchtigkeiten (s) und Feuchtigkeitsgefällen des vorigen Abschnittes besteht nach den in den Psychrometertafeln wiedergegebenen Formeln die Beziehung

$$s = 0{,}622 \frac{e}{b - 0{,}378\, e},$$

worin b den Barometerstand in Millimetern bedeutet. Der Sättigungsdruck bei 20°, $E_{20} = 17{,}4$ mm, entspricht daher beispielsweise einer spezifischen Feuchtigkeit

$$s = 0{,}622 \frac{17{,}4}{760 - 0{,}378 \,.\, 17{,}4} = 0{,}622 \,.\, \frac{17{,}4}{753} = 14{,}4 \quad 10^{-3}\ \mathrm{g/g}$$

oder allgemein, da das Abzugsglied $0{,}378\, e$ gegenüber b verhältnismäßig klein ist (nur ca. 1%) und daher vernachlässigt werden kann,

$$s \approx \frac{0{,}622}{b} \,.\, e.$$

Für unser Versuchsgelände in 300 m Seehöhe mit durchschnittlich 730 mm Luftdruck ist

$$s \approx 0{,}85 \,.\, 10^{-3}\, e,$$

d. h. die spezifische Feuchtigkeit in mg/g Luft beträgt ungefähr 85% des Dampfdruckes.

Versuchen wir auf dieser Grundlage einen Zahlenvergleich zwischen unseren Absorptions- und Psychrometermessungen, so

[1] Wir brauchen diesen Dampfdruck und nicht die in den Psychrometertafeln daneben angegebene und meist gesuchte relative Feuchtigkeit, die sich aus dem Verhältnis des tatsächlichen Dampfdruckes zum Sättigungsdruck der betreffenden trockenen Temperatur ($e : E$) ergibt.

fällt er, bei größenordnungsmäßig und statistisch befriedigender Übereinstimmung im ganzen, für den Einzelfall überraschend unbefriedigend aus. Die größte Unstimmigkeit bringt der schon oben als unglaubhaft bezeichnete Abfall der mittäglichen Absorptionswerte trockener Tage, der in den Psychrometerwerten keine Bestätigung findet und zur Folge hat, daß den Vormittagswerten der Chlorkalziumbestimmung relativ kleinere psychrometrisch bestimmte Dampfdrucke zugeordnet sind als den Nachmittagswerten.

Die Ursache der Mißstimmigkeit ist wohl, wie schon im vorigen Abschnitt ausgeführt, in erster Linie bei der Absorptionsmethode zu suchen (unzureichende Absorption an gebrauchtem Chlorkalzium gegenüber warmtrockener Luft). Immerhin wäre auch daran zu denken, daß die Wasserversorgung der feuchten Thermoelemente durch die über ein Dezimeter langen Dochtleitungen bei großer Trockenheit auch ohne sichtbares Austrocknen beeinträchtigt sein könnte (Dampfdruckerniedrigung), was eine zu kleine Psychrometerdifferenz und damit einen zu hohen Feuchtigkeitsgehalt vortäuschen würde.[2]

Wahrscheinlich ist ein Fehler auf dieser Seite nicht, da ja auch das frisch und unmittelbar befeuchtete Aspirations-Psychrometer die höheren Wasserdampfgehalte anzeigt. Immerhin soll der Punkt beachtet und geklärt werden, wenn die Versuche in besseren Zeiten wieder aufgenommen werden.

Die andere, weniger auffällige Unstimmigkeit betrifft die Größe des Gefälles:

Während bei der Absorptionsmethode die Gefälle am Vormittag in der Regel um 10% liegen und über Mittag mehr oder weniger verschwinden, liegen bei der psychrometrischen Bestimmung die Gefälle häufig um und über 20% und bleiben meist auch über Mittag deutlich erhalten. Als Beispiel sei die genaue punktweise Auswertung des in Abb. 5 niedergelegten Tagesganges wiedergegeben (Tab. 2).

---

[2] Praktische Winke für eine einwandfreie Wasserzufuhr zu Psychrometern (durch Auslaugen in Sodalösung entfettete Baumwolldochte, welche monatlich erneuert werden müssen) gibt Linkes Meteorologisches Taschenbuch, S. 162.

Tabelle 2.

Tagesgang von Psychrometerdifferenz und Dampfdruck nach den Multithermographenaufzeichnungen vom 29. Juli 1943 (Abb. 5).

Zeit	I (untere Meßstelle)			II (obere Meßstelle)			Dampfdruck-gefälle
	t	*f*	*e*	*t*	*f*	*e*	$e_{II}-e_{I}$
0—1	13,8°	12,9°	10,7 mm	16,7°	13,2°	9,6 mm	1,1 mm
1—2	13,4°	12,7°	10,7	16,0°	12,7°	9,4	1,3
2—3	12,7°	12,1°	10,3	15,4°	12,1°	8,9 „	1,4 „
3—4	11,9°	11,3°	9,7	15,1°	11,7°	8,6 „	1,1 „
4—5	11,5°	11,2°	9,8	14,7°	11,5°	8,6 „	1,2
5—6	10,9°*)	10,8°*)	9,7 „	14,2°	11,0°	8,2 „	1,5 „
6—6.30	12,1°	11,6°	10,0 mm	15,0°	11,6°	8,5 mm	1,5 mm
6.30—7	14,0°	13,0°	10,7	16,7°	12,7°	9,0	1,7
7—7.30	16,8°	14,9°	11,8	18,0°	14,3°	10,4 „	1,4 „
7.30—8	18,2°	15,8°	12,3	18,4°	14,6°	10,6	1,7
8—9	20,5°	17,3°	13,2	20,3°	15,7°	11,1	2,1
9—10	24,4°	18,8°	13,5	23,3°	16,7°	11,0	2,5 „
10—11	28,0°	20,0°	13,5	26,9°	16,7°	11,3	2,2 „
11—12	29,6°	20,5°	13,5	27,7°	18,3°	11,1 „	2,4 „
12—13	31,4°	21,6°	14,5 mm	28,6°	18,9°	11,5 mm	3,0 mm
13—14	32,1°	21,2°	13,4	30,5°	19,1°	10,9	2,5 „
14—15	31,9°	21,1°	13,4	30,1°	18,9°	10,8	2,6
Zum Vergleich: Assmann-Psychrometer 15.15 Uhr:							
	30,7°	19,9°	12,0 mm	30,1°	19,0°	10,9 mm	1,1 mm
15—16	31,5°	21,2°	13,7	30,5°	19,1°	10,9	2,8
16—17	29,3°	20,6°	13,8	29,3°	18,8°	11,0	2,8
17—18	27,0°	19,7°	13,6 „	27,3°	18,6°	11,7 „	1,9 „
18—19	25,0°	20,1°	15,2 mm	26,1°	18,5°	12,2 mm	3,0 mm**)
19—20	22,3°	19,5°	15,6	24,9°	18,4°	12,6	3,0
20—21	18,9°	17,5°	14,3	22,7°	17,4°	12,3	2,0
21—22	17,4°	16,2°	13,2	21,2°	16,8°	12,1	1,1
22—23	16,6°	15,4°	12,5	20,6°	16,4°	11,9	0,6 „
23—24	15,3°	14,6°	12,1	20,0°	15,4°	10,8	1,3

*) In der letzten Viertelstunde $t = f$ (Tau).

**) 18.30—19 Uhr Gefällemaximum 3,7 mm!

Bei den fünf Beobachtungstagen, an denen vom Vorstehenden abweichend auch die Psychrometer-Registrierungen mittags schwach positive Gefälle ergeben, handelt es sich zweimal um Regenschauer, einmal um einen auch bei den Absorptionsbestimmungen in die Augen springenden Feuchtlufteinbruch, der da Gefälle nach dem ausgetrockneten Boden umkehrt. In zwei Fällen wird diese Umkehr auch durch die Ablesungen des Assmann-Psychrometers bestätigt.

Um die Ursache dieser für unsere Fragestellung noch wesentlicheren Unstimmigkeit in den Gefällewerten aufzuklären, steht uns noch eine weitere Kontrolle zur Verfügung: die täglichen Ablesungen des Assmannschen Aspirationspsychrometers um 8 und 14 Uhr. Zu einem Vergleich eignen sich dank der größeren Ausschläge in erster Linie die 14-Uhr-Ablesungen. Sie ergeben, wie bereits theoretisch erwartet, für die untere Meßstelle eine systematische Abweichung zwischen den beiden Instrumenten, indem f_I und damit auch der Unterschied $f_I - f_{II}$ bei der thermoelektrischen Bestimmung ohne Belüftung höher liegt als bei der mit dem Aspirationspsychrometer. Wir verweisen zum Beleg für diesen schwachen, aber durch seine regelmäßige Wiederkehr eindeutig gesicherten Effekt noch einmal auf Abb. 5, in der wie alle Tage bei der 14-Uhr-Marke die Ablesungen mit dem Assmann-Instrument miteingetragen sind: Danach sollten die beiden Feuchttemperaturen nur 0,9° auseinander liegen, während bei der Registrierung der Unterschied nahezu 2° beträgt. Da sich jeder systematische Fehler bei der Feuchtigkeitsbestimmung nur einer Meßstelle bei der anschließenden Gefälleberechnung vervielfacht auswirkt, kommt der Klärung dieses Punktes methodisch entscheidende Bedeutung zu. Es ist nun gewiß möglich, daß die Unstimmigkeit zum Teil zu Lasten des Assmann-Psychrometers geht, denn dieses ist nun einmal kein geeignetes mikroklimatisches Meßgerät, und es ist durchaus wahrscheinlich, daß die in 50 cm Höhe angesogene Luft, besonders zur Zeit unstabiler Temperaturschichtung (Mittag), zum Teil auch aus höheren Schichten stammt (die in 50 cm gemessene feuchte Temperatur des „Assmann“ liegt stets zwischen den in 50 und 150 cm Höhe gemessenen der feuchten Thermonadeln). Trotzdem muß aber schon theoretisch wegen der ungleichen Belüftung mit einem Fehler auch auf Seite der Thermoelemente, vor allem des schwächer belüfteten unteren, gerechnet werden.

Über die Größe dieses Fehlers (mit sinkender Belüftung beträchtlich abnehmende Psychrometerdifferenz, wodurch zu hohe Feuchtigkeiten vorgetäuscht werden) besitzen wir nun erfreulicherweise zwei neuere Spezialuntersuchungen: Während

Rossi 1933 die Abweichungen zwischen Assmann- und Thermoelement-Psychrometern in 12 und 200 cm über dem Boden bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten systematisch untersuchte und Reduktionsfaktoren berechnete, stellte Wald 1932 an Thermoelementen verschiedener Bauart fest, daß die endgültige Psychrometerdifferenz bei um so schwächerer Belüftung erreicht wird, je größer die relative Oberfläche des Thermometerkörpers ist; Thermonadeln von 0,1 mm Durchmesser ergeben bei genügend feiner Umhüllung (Wollfaden) sogar in ruhiger Laboratoriumsluft bereits ohne Belüftung praktisch einwandfreie Werte. Wenn man dieser Erkenntnis Rechnung trägt und die ziemlich groben Thermonadeln, mit denen Hartmann & Braun ihren Sechsfarbenschreiber ausstatten, durch entsprechend feinere oder auch Platinwiderstandsthermometer ersetzt, wird eine völlig einwandfreie Feuchtigkeitsregistrierung ohne weiteres erreichbar sein. Damit wären die idealen Voraussetzungen für die eine Seite unserer Bestimmungen, die des Feuchtigkeitsgefälles, geschaffen und wir müssen uns nunmehr der Betrachtung der anderen Seite, der Messung des Austausches, zuwenden.

3. Austauschmessung auf Grund des Windgeschwindigkeitsprofiles

a) Theoretische Grundlagen

Es gehört zum Wesen der turbulenten Durchmischung, daß sie alle in den Turbulenzelementen enthaltenen Eigenschaften in gleichem Maße austauscht: stoffliche Eigenschaften, Wärmegehalt und mechanische Energie. Die Bestimmung des Austauschkoeffizienten A kann sich daher grundsätzlich auf jede beliebige dieser Eigenschaften stützen und wird jene bevorzugen, die am günstigsten meßbar ist. Am idealsten erscheint in dieser Hinsicht die Messung der Wärmeabfuhr aus dünnen Drähten, wie sie Albrecht in seinen Hitzdraht-Anemometern verwirklicht hat, weil so feine Meßkörper die natürliche Turbulenz in keiner Weise stören.[1]

Über einen auf dieser Grundlage entwickelten speziellen „Austausch- vgl. Kleinschmidt, Handb. d. meteorol. Instrumentenkunde, S. 184.

Da mir Hitzdraht-Anemometer nicht zur Verfügung standen, mußte ich mich damit begnügen, wie Thornthwaite und Holzman den Austauschkoeffizienten aus der Differenz der in zwei verschiedenen Höhen mit Schalenkreuzanemometern gemessenen Windgeschwindigkeiten zu berechnen. Der Berechnung des Austausches auf dieser Grundlage kommt der Umstand zugute, daß durch Untersuchungen aus dem Prandtlschen Institut in Göttingen die Zusammenhänge theoretisch weitgehend geklärt sind. Ich verweise auf die sehr klare Übersicht in dem schon mehrfach genannten Buche von Lettau (§ 23), der mich überdies bei der Durchführung und Auswertung der Versuche in entgegenkommendster Weise beriet. Ich will versuchen, das für das Verständnis des folgenden Unerläßlichste in Kürze hier klarzumachen:

Prandtls Schüler Paeschke hat 1937 in seiner Dissertation mit Hilfe eines schwenkbaren Armes, an dessen Spitze eine Hitzdrahtsonde angebracht war, das Geschwindigkeitsprofil über verschieden bewachsenem Gelände abgetastet. Dabei zeigt sich eindeutig, daß in völliger Analogie zu Gesetzen der Hydrodynamik die Windgeschwindigkeit in den untersten Dekametern einem logarithmischen Verteilungsgesetz der allgemeinsten Form

$$u(z) = a + b \log (z + c)$$

gehorcht, in dem $u(z)$ die Windgeschwindigkeit in der Höhe z, z selbst die Höhe bedeutet. Die beiden Konstanten a und b besagen, daß erstens die Geschwindigkeit Null je nach Bewachsung verschieden hoch über dem Boden erreicht wird und daß zweitens der weitere Geschwindigkeitsanstieg verschieden steil erfolgen kann. Die Konstante c dient nur dazu, die u-Werte im positiven Bereich zu halten, da ohne sie $\log z$ für $z = 0$ $-\infty$ würde. Es gelingt, diese Konstanten mit bestimmten Eigenschaften der Geländebewachsung z'_0 (der mittleren empirischen Höhe der Bewachsung) und h_0 (der auf Grund der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung rechnerisch extrapolierten Höhe, in welcher die Geschwindigkeit Null wird) zu verknüpfen, wodurch die Gleichung für die Geschwindigkeitsverteilung die Form annimmt:

$$u(z) = 5{,}75\, v_* \log \frac{7{,}35\,(z - z'_0)}{h_0}.$$

v_* bedeutet dabei die im ganzen Geschwindigkeitsprofil konstant bleibende „Schubspannungsgeschwindigkeit“, die sich numerisch als die Geschwindigkeitsänderung auf der „mittleren Weglänge“ ergibt:

$$v_* = l \cdot \frac{du}{dz}$$

Um den Sachverhalt ohne viel Mathematik klarzumachen, habe ich die von Paeschke über verschiedenen Bewuchs ermittelten Geschwindigkeitsprofile in der Weise umgerechnet, daß die in 200 cm herrschende Geschwindigkeit einheitlich gleich 100 gesetzt wird. Wir erhalten dann die in Abb. 6 wieder-

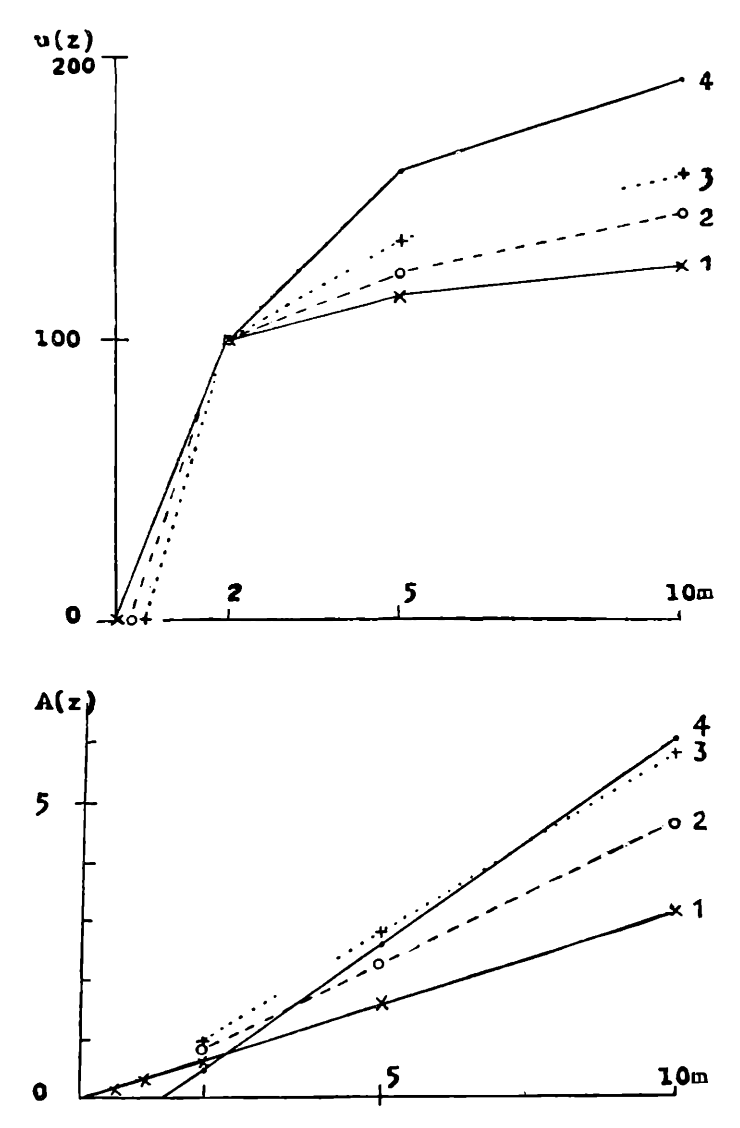


Abb. 6. Profile der Windgeschwindigkeit $u(z)$ und des Austausches $A(z)$ über verschieden bewachsenem Gelände.

Auf Grund der von Paeschke ermittelten Konstanten für eine in zwei Meter Höhe einheitliche Windgeschwindigkeit u (200) = 100 cm/sec von mir berechnet. *1* (dick ausgezogen) Schnee (Höhe $z'_0 = 3$ cm) *2* (gestrichelt) niedriges Grasland (20 cm), *3* (punktiert) Rübenland (45 cm), *4* (dünn ausgezogen) Weizenfeld (130 cm).

gegebenen Geschwindigkeitskurven. Wir ersehen daraus deutlich, daß die Geschwindigkeit in einer Meßhöhe allein noch nichts über das Geschwindigkeitsprofil und damit über den Austausch aussagen kann, weil sie der Schnittpunkt ganz verschieden steiler Gefälle sein kann.[1] Je geringer die Bodenrauhigkeit, desto tiefer greift die Geschwindigkeit, desto geringer ist aber auch ihr Anstieg mit der Höhe und umgekehrt. Wohl aber genügt, nachdem das Gesetz der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung feststeht, nunmehr die Geschwindigkeitsmessung in zwei Höhen, um den gesamten Kurvenverlauf und insbesondere die „Rauhigkeitslänge" h_0 rechnerisch zu extrapolieren. Letzteres geschieht am einfachsten graphisch im halblogarithmischen Netz, wofür bereits unsere eigenen Messungen auf dem Kartoffelfeld als Beispiel dienen können (Abb. 7)[2].

Bezüglich des von uns eigentlich gesuchten Austauschkoeffizienten A muß ich mich unter erneutem Hinweis auf Lettau (§ 23, S. 75) mit der Andeutung begnügen, daß dieser im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit mit der Höhe nicht nur logarithmisch, sondern linear zunimmt, weil gleichzeitig mit der horizontalen Windgeschwindigkeit auch die für den Erfolg der Durchmischung sehr maßgebende freie Weglänge zunimmt. Wenden wir die Formel

$$A = \rho v_* \; 0{,}4\,(z - z'_0),$$

in welcher ρ die Dichte der Luft bedeutet, auf Paeschkes Zahlenmaterial an, so ergibt sich die einleuchtende Tatsache, daß der gleichen Windgeschwindigkeit $u(200)$ ein um so größerer Austauschkoeffizient A zugeordnet ist, je steiler in dieser Höhe das Gefälle, also je rauher die Unterlage ist. Mit der Annäherung an diese kehrt sich dann freilich das Verhältnis um, da beispielsweise über Schnee erst in 3 cm, über Rübenland dagegen bereits 49 cm über dem Boden praktisch Ruhe herrscht und damit auch der Austausch erlischt.

Zum Schlusse sei nicht verschwiegen, daß sich nach neueren Erkenntnissen (Lettau, § 24/25, Prandtl, 1944, S. 108) das W. Schmidtsche Postulat völliger zahlenmäßiger Gleichheit des mechanischen und thermischen Austausches nicht ganz bestätigt hat, vielmehr addiert sich infolge der anderen Richtung

[1] Dem Botaniker ist eine solche Überschneidung logarithmischer Kurven vor allem von der Lichtabhängigkeit der CO_2-Assimilation bei Sonnen- und Schattenblättern geläufig, von denen letztere bei niedriger, erstere bei hoher Lichtintensität stärker assimilieren.

[2] Wie ich mich nachträglich überzeugte, ist diese vereinfachte graphische Bestimmung der Rauhigkeitslänge h_0 mathematisch nicht einwandfrei, weil die Höhen z nicht von Null, sondern von z'_0 gezählt werden müssen und $\log(z - z'_0)$ keineswegs einfach gleich $\log z - \log z'_0$ ist. Eine genaue Anweisung zur Konstantenermittlung gibt Paeschke. Da die Varianten der Rauhigkeitslänge zwischen 21 und 45 cm nach Tab. 4 auf den Verlauf in dem uns interessierenden Bericht fast ohne Einfluß bleiben, habe ich aber von einer Neuberechnung abgesehen.

die Wirkung der thermischen Turbulenz noch zu der aus horizontalen Windgeschwindigkeitsunterschieden erfaßten mechanischen; bei der Überströmung erhitzter Stäbe, Platten und Rohre ergab sich in der Summe ein 40—100% erhöhter Gesamtaustausch. Bei den viel geringeren Temperaturgefällen im Freien muß sich der Unterschied in bescheideneren Grenzen halten und kann von uns zunächst vernachlässigt werden. Sobald die Windgeschwindigkeiten mit Hitzdrahtanemometern gemessen werden, wird auch diese kleine Ungenauigkeit schwinden, weil diese ja auch auf die thermische Aufwindkomponente ansprechen.

b) Eigene Bestimmungen

Das Ausgangsmaterial für unsere eigenen Austauschbestimmungen bilden, wie gesagt, die Ablesungen zweier Schalenkreuzanemometer, die in den gleichen Höhen mit den übrigen Instrumenten (Absorptionsröhren, Thermoelement-Psychrometern) angebracht waren (vgl. Abb. 2). Sie liefen nicht dauernd, sondern wurden jeweils gleichzeitig mit den Absorptionsröhren an- und nach einer Stunde wieder abgestellt, so daß synchron zu den Absorptionswerten der Windweg einer Stunde abgelesen wurde.

Die Ergebnisse bedürfen hinsichtlich der oberen Meßstelle kaum einer Erläuterung (Tab. 3):

Tabelle 3.

Tagesgang der Windgeschwindigkeit in 150 cm Höhe in Metern je Stunde (Mittelwerte):

Zeitraum	5—7	7—8	8—10	11—12	14—16	16—18	18—19	20—22 Uhr
15.—22. 7.	44 (0 an 3 von 5 Meßtagen)	570	2203	3428	2621	2193	279	36 (einmal 0)
23.—30. 7.	4 (viermal 0)	329 (einmal 0)	2625	4040	3705	2091 (einmal 0)	—	599
2.—10. 8.	1270	—	3305	3296	2888	2084	—	—
11.—20. 8.	848 (einmal 0)	—	1518	2389	2110	1106	—	—
23.—31. 8.	1064 (einmal 0)	—	1658	3348	2615	2088	—	—
1.—17. 9.	130 (0 an 2 von 6 Meßtagen)	—	520	2932	1946	801 (0 an 2 von 7 Meßtagen)	—	—

Der morgendlichen und abendlichen Windstille, deren Bewegungen vielfach unter der Reibungsschwelle der Schalenkreuze liegen, steht die bekannte mittägliche Belebung der Turbulenz gegenüber, obwohl das Windmaximum von durchschnittlich noch nicht ganz 1 m/sec (3600 m/h) fast ausnahmslos schon 11—12 Uhr und nicht erst nachmittags erreicht wird. Zum absoluten Betrag der Luftbewegung ist zu sagen, daß das Versuchsgelände fast 100 m über der Talsohle nahe der obersten Kuppe des Forstgartens liegt und daher der Austausch verhältnismäßig lebhaft ist.

Einer eingehenderen Betrachtung bedarf die für die Austauschberechnung grundlegende Windbremsung nach der unteren Meßstelle (50 cm): Theoretisch sollte bei gleichbleibender Bodenrauhigkeit die Windgeschwindigkeit in 50 und 150 cm Höhe in einem konstanten Verhältnis stehen; praktisch wird aber diese Gesetzmäßigkeit durch die Reibungsschwelle der Schalenkreuzanemometer gestört, welche das untere Instrument im allgemeinen erst bei „oberen" Windgeschwindigkeiten über etwa 1000 m/h ansprechen läßt (Abb. 7).[1] Infolgedessen erscheint das Verhältnis $u(50):u(150)$ bei kleinen Windgeschwindigkeiten zu klein und nähert sich erst bei größeren dem wahren Verhältnis. Am besten eliminiert man die Reibungsschwelle beider Instrumente, indem man die Geschwindigkeitsanstiege in einem Bereich, in welchem beide Instrumente ansprechen, ins Verhältnis setzt:

$$\frac{\triangle u(50)}{\triangle u(150)} = \frac{u(50)_{\mathrm{II}} - u(50)_{\mathrm{I}}}{u(150)_{\mathrm{II}} - u(150)_{\mathrm{I}}},$$

z. B. aus den Wertepaaren des 19. und 21. Juli, 14—15 Uhr: $\frac{535 - 185}{5129 - 2168} = \frac{350}{2961} = 0{,}118$. Um dieser wichtigen Verhältniszahl die gesamten Einzelwerte zugrunde zu legen, bestimmen

[1] Dieses räumliche Abklingen der Windgeschwindigkeiten in Bodennähe bestärkt uns noch mehr als das zeitliche am Morgen und Abend in dem Wunsche, bei künftigen Versuchen dieser Art Hitzdraht-Anemometer einzusetzen, welche gerade bei den niedrigsten Geschwindigkeiten die größte Empfindlichkeit besitzen.

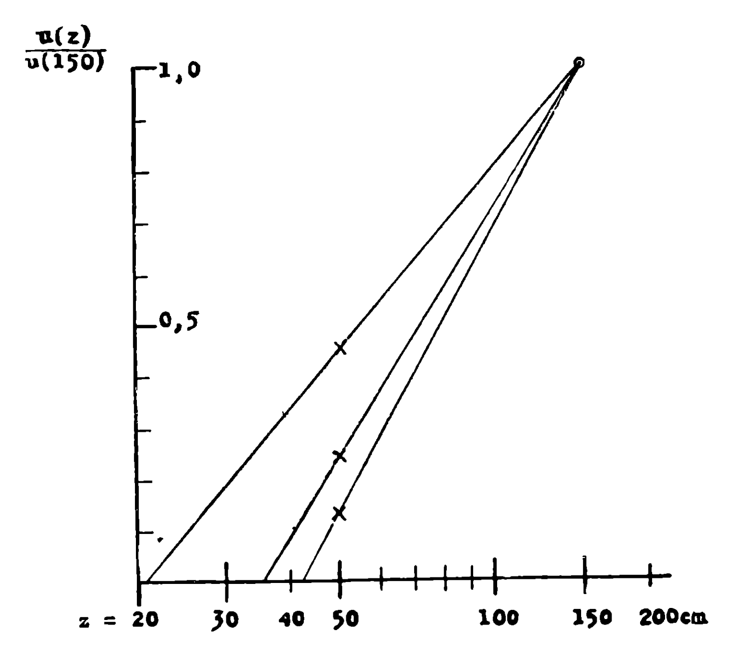


Abb. Graphische Ermittlung der Rauhigkeitslänge h_0 aus der logarithmischen Abnahme der Windgeschwindigkeit.

Abszisse: Höhe (logarithmische Teilung), Ordinate: relative Windgeschwindigkeit (Geschwindigkeit in 150 cm als Einheit).

wir die Steigung in der graphischen Darstellung nach Augenmaß (Abb. 8).

Dabei ergibt sich graphisch genau wie bei der rechnerischen Kontrolle die einleuchtende Tatsache, daß die Bremswirkung unseres Kartoffelfeldes mit fortschreitender Vegetationsperiode nachließ. Während bei Beginn unserer Versuche Mitte Juli im Niveau der vollsaftigen Kartoffelblätter nur rund ein Zehntel der freien Windgeschwindigkeit herrschte, stieg die relative Windgeschwindigkeit mit dem Welken der Stauden in der Trockenperiode Ende Juli/Anfang August auf 24 % und mehr an, um schließlich beim Einziehen im September etwa 45 % zu erreichen. Extrapolieren wir auf Grund des logarithmischen Geschwindigkeitsgesetzes graphisch (Abb. 7) auf jene Rauhigkeitslänge h_0, bei welcher die Windgeschwin-

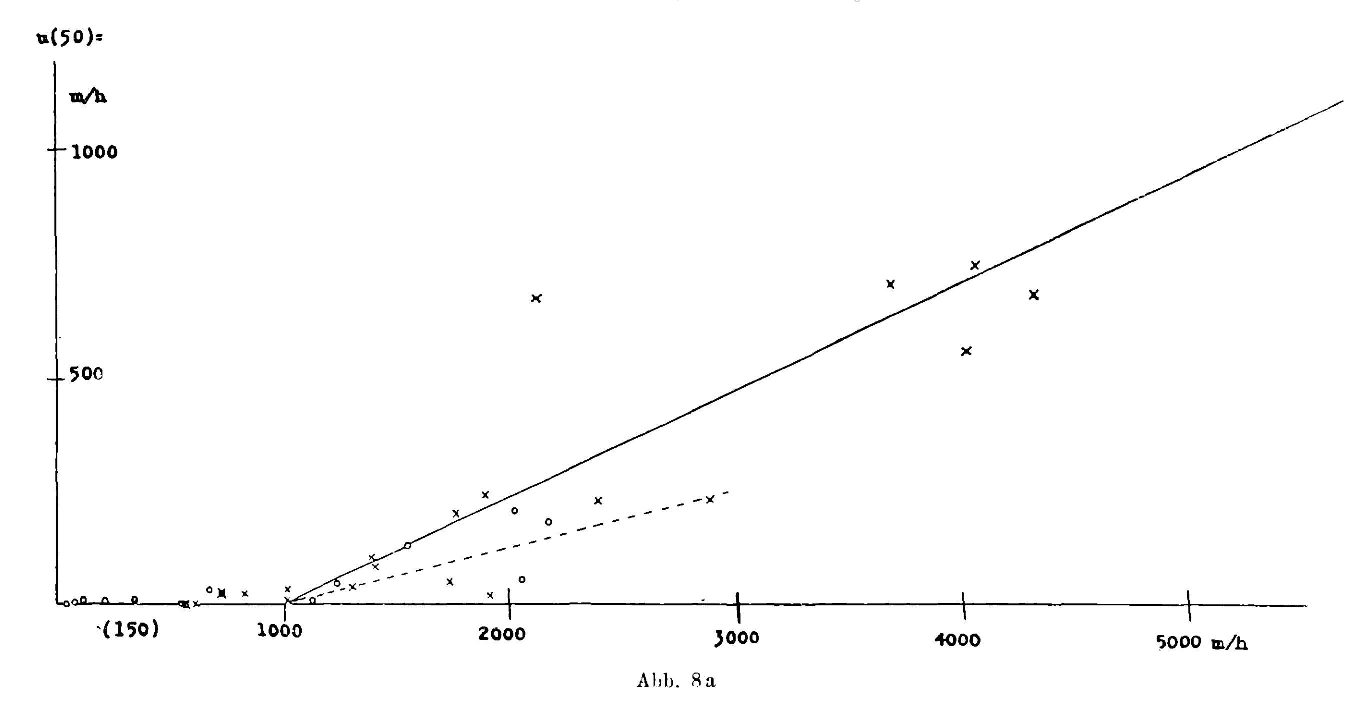


Abb. 8a

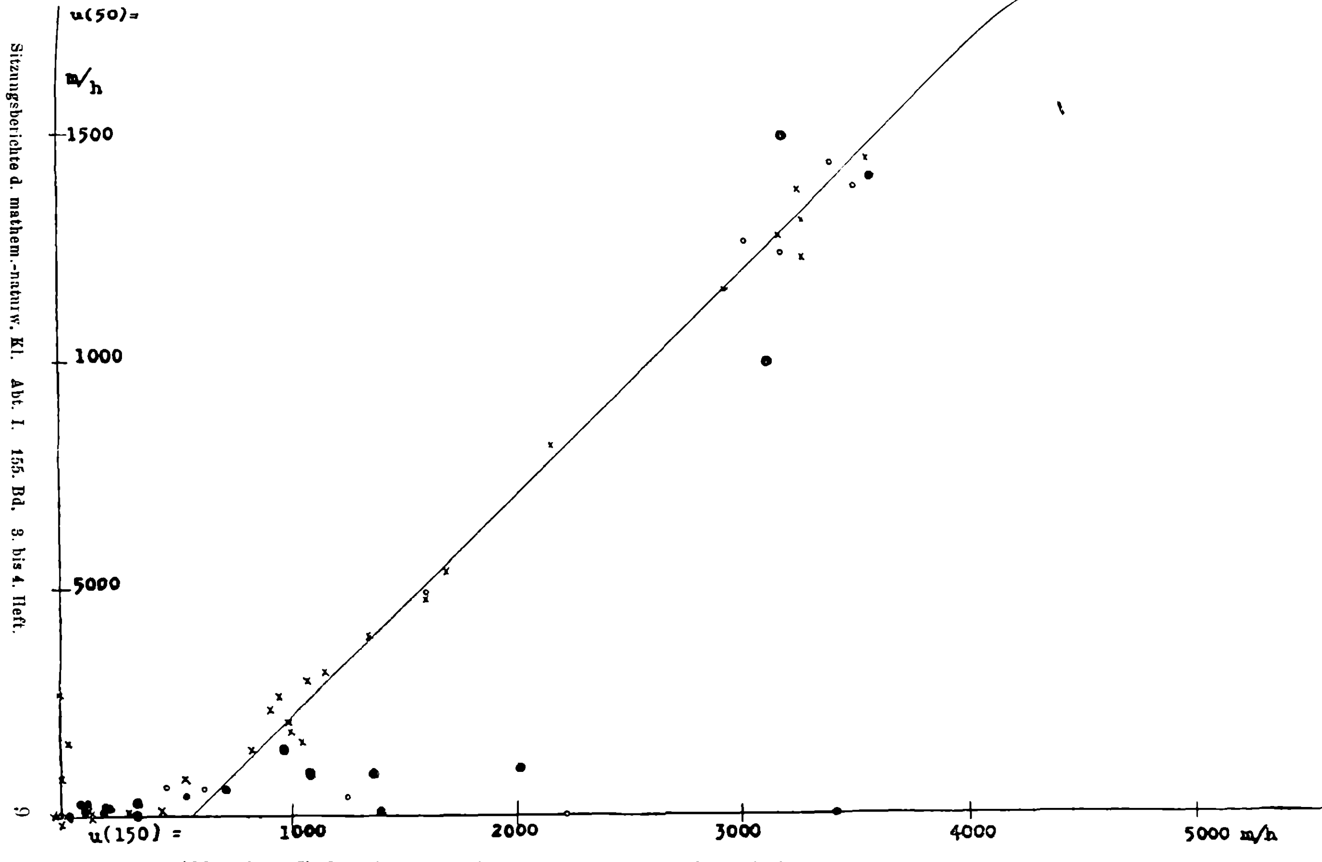


Abb. 8b. Windgeschwindigkeit der unteren Meßstelle u (50) in Abhängigkeit von der der oberen u (150).
Die Werte vor dem 20. Juli (Ringe) entsprechen einer Kurvensteigung von etwa 0,13, die vom 21. bis 31. Juli (liegende Kreuze) einer solchen von 0 24, die des August (stehende Kreuze) und September (Punkte) einer zwischen 0,4 und 0,5 (Steigung der eingetragenen Geraden 0,5).

digkeit Null werden müßte, so finden wir sie anfangs bei 45 cm, schließlich bei 21 cm (Tab. 4).

Tabelle 4.

Beziehung zwischen relativer Windgeschwindigkeit $\frac{u\,(50)}{u\,(150)}$ und Rauhigkeitslänge h_0.

Zeitraum	Rel. Windgeschwindigkeit	Rauhigkeitslänge
15.—20. 7.	0,13	43 cm
21.—31. 7.	0,24	36 cm
August/September	0,40—0,50	21 (25—17) cm

Damit verfügen wir über alle Größen, welche zur Berechnung des Austauschkoeffizienten nötig sind. Wir berechnen ihn nach der Formel

$$A(z) = \rho \,.\, v_* \,.\, l,$$

wobei nach Umstellung der oben gegebenen Gleichung die Schubspannungsgeschwindigkeit

$$v_* = \frac{u(z)}{5{,}75 \log \frac{7{,}35\,(z - z'_0)}{h_0}}, = \frac{u(z)}{4{,}98 + \log\,(z - z'_0) - \log h_0},$$

während die freie Weglänge $l = 0{,}4\,(z - z'_0)$.

In unserem Falle ist $z = 150$, die empirische Höhe der Vegetation z'_0 anfangs 50 cm, ab August nur noch mit rund 35 cm, die rechnerisch extrapolierte Rauhigkeitslänge h_0 von 45 auf 21 cm abnehmend anzusetzen. Gegenüber der Größe des Grundgliedes 4,98 (= 5,75 . log 7,35) wirken sich übrigens unsere nur nach Zentimetern messenden Veränderungen in der Vegetationshöhe z'_0 und h_0 schon auf die Größe der Schubspannungsgeschwindigkeit v kaum aus; bei der Berechnung des Austausches verringert sich dieser Einfluß weiter, weil der mit der sinkenden Vegetationshöhe abnehmenden Schubspannung (Scherwirkung) eine größere freie Weglänge l gegenübersteht. Wir erhalten dann für die Beziehung zwischen Austausch A (150) und Windgeschwindigkeit u (150) nachstehende Koeffizienten:

Tabelle 5:
Koeffizienten zur Berechnung des Austausches aus der Windgeschwindigkeit.

Zeitraum	h_0	z'_0	$A(150)$	$A(50)$	$A(50/150)$
15.—20. 7.	43 cm	50 cm	0,0090 u (150)	0,00058 u (150)	0,0048 u (150)
21.—31. 7.	36	45 „	0,0092 u (150)	0,00113 u (150)	0,0052 u (150)
Aug./Sept.	21	35 „	0,0095 u (150)	0,00214 u (150)	0,0057 u (150)

Einer Windgeschwindigkeit von 1 m/sec = 100 cm/sec entspricht demnach ein Austauschkoeffizient von 0,90—0,95 $g cm^{-1} sec^{-1}$.[2]

Ehe wir nun durch Multiplikation mit den tatsächlichen Windgeschwindigkeiten (Tab. 2) den Austausch für die einzelnen Versuchsstunden berechnen, wollen wir uns noch klarmachen, daß auf Grund des linearen Anstieges des Austausches mit der Höhe ab h_0 (wo der turbulente Austausch verschwindet) für A (50) folgende Beziehung gilt:

$$A(50) = A(150) \; \frac{50 - h_0}{150 - h_0},$$

ebenso für den mittleren Austausch zwischen unseren beiden Meßstellen

$$A(50/150) = A(150 \,.\, \frac{100 - h_0}{150 - h_0}.$$

Wir haben die danach berechneten Koeffizienten für A (50) und A (50/150) in Tab. 4 gleich mit aufgenommen. Für Überschlagungsrechnungen können wir ohne großen Fehler A (150) für jeden Sekundenmeter Windgeschwindigkeit (in 150 cm) gleich 1, A (50/150) gleich 0,5 setzen.

Da wir für die weiteren Überlegungen nicht A (150), sondern die mittlere Turbulenz zwischen unseren beiden Meßstellen A (50/150) brauchen, geben wir abschließend durch Multiplikation der in Tab. 2 und 4 niedergelegten Einzelwerte eine Tab. 6 der mittleren Austauschkoeffizienten; die Werte der Tab. 3 müssen zu diesem Zweck von m/h auf cm/sec umgerechnet werden.

[2] Daß in 150 cm Höhe der kleineren Rauhigkeit noch ein größerer Austausch entspricht, steht keineswegs in Widerspruch zu dem vorher theoretisch Ausgeführten; wir befinden uns lediglich noch unterhalb des Schnittpunktes mit der deutlich steiler ansteigenden Austauschgeraden für die größere Rauhigkeitslänge. (Vgl. dazu noch einmal Abb. 6!)

Tabelle 6.

Mittlere Austauschkoeffizienten zwischen 50 und 150 cm in gcm^{-1} sec^{-1}.

Zeitraum	5—7	7—8	8—10	11—12	14—16	16—18	18—19	20—22 Uhr
15.—22. 7.	0,006	0,075	0,29	0,46	0,35	0,29	0,04	0,005
23.—30. 7.	0,001	0,048	0,38	0,58	0,54	0,30	—	0,085
2.—10. 8.	0,20	—	0,52	0,52	0,46	0,33	—	—
11.—20. 8.	0,13	—	0,24	0,38	0,34	0,17	—	—
23.—31. 8.	0,17	—	0,28	0,53	0,41	0,33	—	—
1.—17. 9.	0,020	—	0,08	0,46	0,31	0,13	—	—

Die Werte bewegen sich auf der in Bodennähe zu erwartenden Höhe, wobei zu berücksichtigen ist, daß $A(150)$ rund doppelt so hoch liegen, also in Einzelfällen den Wert 1 etwas überschreiten würde. Die niedrigsten Werte können infolge der Reibungsschwelle der Schalenkreuzanemometer nicht als zuverlässig gelten, sondern müssen zu klein erscheinen.

4. Berechnung des Wasserdampfstromes aus Gefälle und Austausch

Wir stehen nunmehr am Ziele des ersten Teiles unserer Bemühungen und brauchen nur die Gefällswerte der Tab. 1 mit den Austauschkoeffizienten der Tab. 5 zu multiplizieren, um die Größe des Wasserdampfstromes in Gramm pro Quadratzentimeter und Sekunde (g/cm^2 sec) zu berechnen. Um diesen Zahlen einen etwas anschaulicheren Inhalt zu geben, sei vorausbemerkt, daß $2\ 10^{-5}\ g/cm^2$ sec 0,36 mm/h, bzw. $2{,}78\ .\ 10^{-5}\ g/cm^2$sec einer Verdunstungshöhe von einem Millimeter je Stunde entsprechen.

Tabelle 7.

Mittelwerte des Wasserdampfstromes in $10^{-5}\ g/cm^2$ sec.

Zeitraum	5—7	7—8	8—10	11—12	14—16	16—18	18—19	20—22 Uhr
15.—22. 7.	+0,0012	0,04	0,18	0,37	(+0,014)	0,15	0,04	0,006
23.—30. 7.	0,0005	0,06	0,42	0,35	(+0,016)	0,66*)	—	0,15*)
2.—10. 8.	0,06	—	0,62	(+0,21)	(+0,009)	(+0,10)	—	—
11.—20. 8.	+0,026	—	0,22	0,11	0,034	0,017	—	—
23.—31. 8.	+0,050	—	0,14	(+0,11)	(+0,021)	(+0,20	—	—
1.—17. 9.	0,006	—	0,008	0,046	(+0,022)	0,09	—	—

*) 27. 7. 16—18 Uhr künstliche Bewässerung!

Als zahlenmäßig brauchbar können vorläufig nur die Vormittagsmessungen von 8 bis 10 Uhr gelten, weil nur zu diesem Zeitpunkt die Gefälle- wie die Windgeschwindigkeitsmessungen einwandfrei außerhalb der Fehlergrenzen unserer Methoden liegen. Morgens und abends konnte mit unseren Schalenkreuzanemometern der Austausch infolge der geringen Windgeschwindigkeiten nur orientierend erfaßt werden, doch wird sich dieser Mangel beheben lassen, sobald die für solche Messungen unerläßlichen Hitzdrahtanemometer mit ihrem gerade bei schwachen Luftströmen liegenden Empfindlichkeitsmaximum eingesetzt werden können. Auf der anderen Seite leiden die Mittagsmessungen unter der eingehend gekennzeichneten Unsicherheit der absorptiven Gefällemessungen während des Höhepunktes der Mittagsturbulenz, doch wird auch dieser Mangel schwinden, wenn die Gefälle aus Psychrometer-Registrierungen ermittelt und damit dem zu dieser Zeit nicht zu vernachlässigenden Temperatureinfluß Rechnung getragen wird.

In der Tat entsprechen die für die Zeit von 8 bis 10 Uhr berechneten Zahlen für den Wasserdampfstrom mit einem Höchstwert von $0{,}62 \cdot 10^{-5}$ g/cm^2 sec $= 0{,}22$ mm/h durchaus der erwarteten Größenordnung. Man darf mit noch höheren Werten rechnen, wenn die Messungen schon während des Höhepunktes der Vegetationsperiode Juni/Juli und nicht erst gegen den Herbst laufen und bei Trockenperioden künstlich bewässert werden kann. Wurde doch bei einmaliger künstlicher Bewässerung am 27. Juli nachmittag 16 bis 18 Uhr einem Austausch (50—150 cm) von 0,25 ($u\,150 = 1764$ m/h $= 49$ cm/sec) ein Gefälle von $4.9 \cdot 10^{-5}$ cm^{-1} beobachtet, woraus sich ein Wasserdampfstrom von $1{,}23 \cdot 10^{-5}$ g/cm^2 sec $= 0{,}44$ mm/h ergibt.

Die nur zu grober Orientierung brauchbaren Werte der übrigen Tagesstunden zeigen morgens und abends den zu erwartenden Abfall, weil insbesondere am Abend trotz der hohen Gefälle der Rückgang des Austausches das Produkt bestimmt. Die Mittagswerte dürfen trotz der besonders großen Unsicherheit als Hinweis auf eine scharfe Mittagsdepression der Transpiration gewertet werden, weil der Austausch nicht in dem Maße gestiegen ist, daß er allein das Verwischen des Gefälles erklären könnte.

Gerade dieser relative Tagesgang wird ja auch durch unsere Transpirationsbestimmungen an Einzelblättern überprüft, die wir zwecks „Eichung“ unserer neuen Methode vorsorglich nebenher regelmäßig durchführten (Schnellwägung mit der Balken-Torsionswaage nach Huber, 1927). Leider haben wir versäumt, rechtzeitig auch die Blattmassen je Quadratmeter Vegetationsfläche zu bestimmen, sonst ließe sich nach dem Vorbild von Pisek und Cartellieri auch auf dieser Grundlage der Wasserdampfstrom in absoluten Einheiten berechnen und damit das Ergebnis der Austauschmethode in willkommener Weise überprüfen.

Tabelle 8.

Transpirations- und Evaporationsbestimmungen mit der Balken-Torsionswaage.

A. Transpirationswerte einzelner Kartoffelblätter in mg/g Frischgewicht je Stunde

Zeitraum	5—7	7—8	8—10	11—12	14—15	17—18	20—22 Uhr
26.—30. 7.	44	267	494	626	600	258	32
	(23-60)	(221-342)	(338-586)	(430-1080)	(111-1560)	(163-326)	(23-39)
2.—10. 8.	47	—	144	372	275	126	—
	(27-76)		(80-267)	(263-444)	(140-560)	(68-198)	
11.—20. 8.	57	—	299	495	502	304	—
	(24-78)		(89-476)	(197-985)	(236-1250)	(122-784)	
23.—31. 8.	76	—	202	243	358	160	—
	(31-150)		(99-316)	(46-579)	(144-742)	(107-239)	
1.—17. 9.	58	60	125	468	332	186	—
	(21-96)	(53-70)	(73-229)	(88-745)	(149-478)	(95-267)	

B. Evaporationswerte der weißen 9 cm-Filtrierpapierscheibe in Milligramm je Stunde (mg/h)

Zeitraum	5—7	7—8	8—10	11—12	14—15	17—18	20—22 Uhr
26.—30. 7.	499	1018	2560	3110	3594	3813	1287
2.—10. 8.	1295	—	1258	2958	2975	3515	—
Mittelwerte der vier schönen Versuchstage dieser Dekade:							
	1598	2420	2660	3420	3953	4082	(Maximum 6150)
11.—20. 8.	721	—	1106	2559	3119	2386	—
23.—31. 8.	399	—	603	1690	2537	2006	—
1.—17. 9.	195	—	451	2225	1658	1025	—

Der Vergleich der meist bis in die Nachmittagsstunden ansteigenden Evaporation mit der in der Regel von 11 bis 12 Uhr

kulminierenden Transpiration zeigt deutlich das allbekannte relative Absinken der Transpiration (Mittagsdämpfung); es ist aber offensichtlich nicht so stark, wie es unsere Austauschberechnungen vortäuschen, die ausnahmslos bereits von 8 bis 10 Uhr kulminieren. Die Bereinigung der Mittagswerte muß daher als eine der Hauptaufgaben für den vollwertigen Einsatz der neuen Methode bezeichnet werden.[1]

Schließlich verdient noch die Frage überlegt zu werden, innerhalb welchen Zeitraumes wir überhaupt mit der Ausbildung eines dynamischen Gleichgewichtes des Wasserdampfstromes rechnen dürfen. Wir wissen z. B. vom Transpirationsstrom des Baumes, daß tagsüber mehr transpiriert wird als nachströmt, wobei der Wasservorrat sinkt, während in der Nacht das Umgekehrte gilt. Noch langfristigere Schwankungen sind für die Grundwasservorräte bekannt, welche durch Trockenjahre auf Jahre hinaus beeinträchtigt sein können. Die Tatsache, daß Wasserdampfgehalt und -gefälle der Luft wechseln, beweist, daß auch hier zeitweilig mehr ab- als zugeführt wird und umgekehrt. Wie lange braucht es nun, bis sich bei veränderter Zu- oder Abfuhr ein neues dynamisches Gleichgewicht ausbildet?

Eine Säule von 1 cm^2 Querschnitt zwischen unseren beiden Meßstellen (150 — 5 = 100 cm) besitzt in ihren 100 cm^3 einen Grundgehalt von durchschnittlich 1 mg Wasserdampf (10 mg/l) und im allgemeinen ein Gefälle von etwa 10% dieses Wertes, also 0,1 mg. Ein sekundlicher Wasserdampfstrom von 0,1—1 10^{-5} g/cm^2, wie ihn Tab. 6 für die Tagesstunden ausweist, vermag bereits in einer Minute dieses Gefälle, wenn es verwischt sein sollte, wiederherzustellen: Die Wasserdampfkapazität der Luft ist also so gering, daß sich das Gefälle in der bodennahen Luftschicht schon innerhalb von Minuten auf jedes neue Gleichgewicht einstellen muß.

Analoges muß wohl auch für die eingangs angeschnittene Frage nach der Länge des Ausströmweges gelten, der zur Ausbildung des typischen Gefälles erforderlich ist: Auch hier werden schon verhältnismäßig kurze Strecken genügen, was am

---

Zur Steigerung der Meßgenauigkeit wird es sich vielleicht doch empfehlen, die Meßstellen etwas weiter auseinander zu rücken; unter Umständen könnte man auch probeweise mit drei Meßstellen arbeiten, wobei sich von der ersten zur zweiten derselbe Strom ergeben müßte wie von der zweiten zur dritten (Gefälle umgekehrt proportional dem Austausch).

besten an der Übergangsstelle möglichst verschieden bewachsener Felder experimentell zu prüfen wäre.

5. CO_2-Gefälle

Für Theorie und Praxis fast noch erstrebenswerter als eine laufende Messung des Wasserverbrauches von Pflanzenbeständen ist die ihrer Kohlendioxydaufnahme und damit ihrer laufenden Stoffproduktion. Liefern doch die Enderträge der Ernte ein Integral, in dessen Zustandekommen aus dem Auf und Ab von Einzelvorgängen Einblick zu gewinnen eine Hauptaufgabe ernährungsphysiologischer und -ökologischer Analyse darstellt.

Aus diesem Grunde erstrebte ich von Anfang an neben der Messung des Wasserdampfgefälles eine solche des CO_2-Gefälles, schon deswegen, weil das Verhältnis beider Größen auch unabhängig von der Austauschmessung eine laufende Kontrolle der Produktivität der Transpiration verspricht:

$$\text{Produktivität der Transpiration} = \frac{\text{Kohlendioxydstrom}}{\text{Wasserdampfstrom}} = \frac{CO_2\text{-Gefälle} \times \text{Austausch}}{\text{Wasserdampfgefälle} \times \text{Austausch}} = \frac{CO_2\text{-Gefälle}}{\text{Wasserdampfgefälle}}$$

Ich dachte zunächst daran, Wasserdampf- und Kohlensäuregehalt der Luft nach dem Vorbild der organischen Verbrennungsanalysen in einem Arbeitsgang hintereinander durch Absorption mit Chlorkalzium und Natronkalk zu erfassen. Schon die Vorversuche im Laboratorium zeigten aber, daß angesichts des geringen CO_2-Gehaltes der Luft, der mit rund 0,5 mg je Liter nur ein Zehntel bis ein Zwanzigstel des Wasserdampfgehaltes beträgt, die gewichtsmäßige CO_2-Bestimmung für die Erfassung doppelter Differentiale (Tagesgang des Gefälles) zu ungenau ist: Bei einer Durchsaugung von 30 Litern je Stunde, die nicht überschritten werden darf, wenn der natürliche Austausch nicht gestört werden soll, werden stündlich etwa 15 mg CO_2 absorbiert; wenn diese Menge auch erwartungsgemäß gut wägbar war, so mußten doch die bestenfalls um ein Milligramm liegenden Unterschiede im CO_2-Gehalt verschiedener Höhen ebenso in

der Fehlergrenze bleiben wie der zu erwartende Tagesgang dieser Unterschiede (nächtliche Anreicherung, tagsüber Verarmung in der Vegetationsschicht).

Wir gingen daher für die Freilandversuche auf unserem Kartoffelfeld sofort zu der unvergleichlich empfindlicheren Assimilationsapparatur von Holdheide, Huber und Stocker (1936) über, welche die aufgenommene Kohlensäure nach Absorption in $^1/_{50}$ n Natronlauge durch Abhören der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Obwohl wir in der Handhabung dieser Apparatur langjährige Erfahrung besitzen, waren auch mit dieser Methode zu unserer Enttäuschung im allgemeinen keine eindeutigen Unterschiede im Kohlensäuregehalt faßbar, wenn die Luftproben, wie für die Feuchtigkeitsbestimmungen, aus 50 und 150 cm Höhe angesogen wurden.[1]

Dieses Ergebnis ist bei näherer Überlegung nicht überraschend, wie soeben ausgeführt, müssen ja Wasserdampf- und Kohlensäuregefälle im gleichen Verhältnis stehen wie Transpiration und Assimilation; dieses beträgt nach sehr zahlreichen Bestimmungen (Zusammenstellung bei Stocker, Tabulae biologicae V, 668 ff.) zwischen 200 und 1000 Gramm Wasserverbrauch je Gramm erzeugter Trockensubstanz.[2] Bei einem Wasserdampfstrom von $0,5 . 10^{5}$ gcm^{-2} sec^{-1} können wir demnach nur mit einem CO_2-Strom von etwa 10^{-5} gcm^{-2} sec^{-1} rechnen. Wenn von diesem fünfhundertmal schwächeren Strom auch ein Zwanzigstel auf Rechnung des kleiner absoluten CO_2-Gehaltes der Luft geht und durch die empfindlichere Methodik erfaßt wird, so bleibt doch überdies ein etwa

[1] Für das Ansaugen diente an Stelle des ursprünglischen Zylinderaspirators der inzwischen von Stocker, Rehm und Petzold 1938, S. 575, beschriebene Wendeaspirator, der ein praktisch kontinuierliches Ansaugen von Luftproben ermöglicht. Wir nahmen, um möglichst weit außerhalb der Fehlergrenze zu kommen, das Abhören des Titers im allgemeinen erst nach zwei Ansaugungen, also 6 Litern mit durchschnittlich etwa 3 Milligramm CO_2, vor. Ich bin meinem Freunde Prof. Stocker, Darmstadt, zu aufrichtigem Dank verpflichtet, daß er uns dieses bisher nur in einem Stück angefertigte Aspiratormodell für unsere Versuche zur Verfügung stellte.

Diese Zahlen geben allerdings nur Durchschnitte für die ganze Vegetationszeit. Kurzfristig sind erhebliche Verschiebungen dieses Verhältnisses zu erwarten, da beispielsweise der nächtliche Wasserverlust ohne produktive assimilatorische Gegenleistung bleibt. Höchstwerte der Produktivität der Transpiration sind zu erwarten, wenn bei feuchter Luft trotz maximaler Spaltweite die Transpiration gering, die Assimilation dagegen optimal ist. Das zu dieser Frage von meinem Mitarbeiter Dr. Polster angehäufte Material synchroner Transpirations- und Assimilationsbestimmungen harrt wegen des Krieges noch der Auswertung.

25mal kleineres relatives Gefälle des CO_2-Gehaltes zu erwarten, zwischen 50 und 150 cm, also vielleicht 0,4—0,5% statt 10% des Gehaltes.

Angesichts dieser Erkenntnis könnte die Messung des CO_2-Gefälles vielleicht aussichtslos erscheinen; ich betrachte es aber bereits als Gewinn, zu wissen, mit welchen Größen zu rechnen ist und welche Empfindlichkeit daher von einer neuen besseren Methode zu verlangen ist. Eine ganz erhebliche Steigerung der Empfindlichkeit bringt bereits die auf meine Anregung beim Friedmannschen Leitfähigkeitsgerät eingebaute Wechselschaltung, welche die Widerstände der beiden Laugengefäße nicht nur absolut gegen einen konstanten Vergleichswiderstand, sondern wahlweise auch relativ gegeneinander abzuhören gestattet (Nullpunktmethode, vgl. Friedmann 1933, S. 290). Der kleinste Unterschied in der Absorption der beiden Gefäße muß auf diese Weise bei wiederholter Probeentnahme zu einer gleichsinnigen und immer eindeutigeren Verschiebung des Meßbrückenwertes führen.[3]

Auf diese Weise konnte zunächst einmal in den frühen Morgenstunden die nächtliche Ansammlung von Atmungskohlensäure in der stabil geschichteten kalten Bodenluft einwandfrei festgestellt werden (Tab. 9A). Um möglichst große Unterschiede zu erhalten, entnahmen wir überdies die Luftproben für die CO_2-Bestimmung weiterhin aus 50 und 500 cm Höhe.

Tabelle 9A.

Beispiele aufeinanderfolgender Meßbrückenablesungen (a) beim Gegeneinanderschalten zweier Elektrodengefäße (E), welche von Luft aus 50 und 500 cm Höhe durchströmt werden. Das Widerstandsverhältnis $E(50)$ $E(500) = a$ $(1000 - a)$. Steigende a-Zahlen bedeuten demnach für $E(50)$ gegenüber $E(500)$ steigende Widerstände infolge starker CO_2-Absorption (Rückgang des Laugentiters). Die Ablesungen wurden vor Beginn, nach

[3] In zahlreichen Blindversuchen vergewisserten wir uns, daß beim Durchsaugen einheitlicher Luftproben (Gabelrohr) keine Verschiebung des Meßbrückenwertes $E_1 : E_2$ (erstes gegen zweites Elektrodengefäß) vorkommt; insbesondere bleiben Unterschiede in der Widerstandskapazität erwartungsgemäß ohne Einfluß auf den Gang des Verhältnisses bei wiederholtem Durchleiten.

einer „Vorspülung“ von 3 Litern und dann dreimal nach Durchleiten von je 6 Litern Luft vorgenommen.

A. Morgenmessungen.

Zeit	1. (Ausgang)	2. (Vorspülung) 3 Liter	3. (Durchsaugung je 6 Liter)	4.	Ablesung
28. 7. 5 Uhr	476	481	491	497	499
29. 7. 5	495	501	507	512	517
30. 7. 5 „	494	495	505	518	530
(während der Trockenperiode Anfang August Gefälle unklar)					
16. 8. 6 Uhr	486	493	496	501	506
18. 8. 5 „	502	507	510	517	534
27. 8. 5.30 Uhr	492	493,3	494,2	492,8	496,5
(starker Wind verwischt das Gefälle)					
31. 8. 6	491	493	497	497	498
1. 9. 6.30	496,5	499,7	503,5	507,8	—
8. 9. 6.20	492,8	495	501,5	503,5	508,2
10. 9. 6.20	504,2	509	514,5	520	526,8
13. 9. 6.15	480,8	489,2	492	496	503
17. 9. 6.15 „	496,2	498,3	502,4	507,4	508

Einer kritischen Überlegung bedarf die Frage, ob der Effekt nicht einfach durch die niedrige Temperatur der Bodenluft vorgetäuscht sein könnte. Tatsächlich scheinen zwei Faktoren auf eine Vortäuschung höherer CO_2-Gehalte der bodennäheren Luftschicht hinauszuwirken: Einmal ist kühlere Luft dichter und enthält daher bei Ansaugung gleicher Volumina auch bei gewichtsmäßig gleichem Gehalt mehr Kohlensäure; zweitens setzt eine Temperaturerniedrigung die elektrische Leitfähigkeit herab und wirkt daher gleichsinnig einer stärkeren CO_2-Absorption. In Wirklichkeit ist aber ein solcher Temperatureffekt an unserem Versuchsergebnis kaum beteiligt: Für die angesogene Luftmenge ist nicht die Temperatur der Außenluft, sondern die der schließlich im Aspirator eingeschlossenen maßgebend und diese hat sich angesichts der geringen spezifischen Wärme bei der Leitung durch die in ein Wasserbad versenkten Absorptionsgefäße und in Berührung mit den Metallwänden des Aspirators weitgehend ausgeglichen. Die Temperatur der Absorptionslauge differierte nach dem Durchleiten in den oben wiedergegebenen Versuchen höchstens um 0,2°.

Weniger sicher erweisen ließ sich die Umkehr des Kohlendioxydgefälles während der Tagesstunden, weil die stärkere Turbulenz auf eine Verwischung des an sich schwachen Gefälles hinarbeitet. Immerhin waren bei den Vormittagsmessungen von 8 bis 9 Uhr (im September von 9 bis 10 Uhr) an elf Tagen deutliche, an vier Tagen sogar zehn Meßbrückeneinheiten übersteigende CO_2-Gefälle gegen die Vegetationsschicht

(500 gegen 50 cm) nachweisbar, während an 14 Versuchstagen kein Unterschied faßbar war; an fünf Tagen bestand Ende August/Anfang September in der bodennahen Schicht von 8 bis 9 Uhr noch die Ansammlung nächtlicher Atemkohlensäure, weshalb der Meßtermin spätergerückt wurde (9—10 Uhr):

Tabelle 9B.

Wie Tabelle 9A, aber Vormittagsmessungen:

Zeit			1.	2.	3.	4.	5. Ablesung
28.	7.	8 Uhr	496	494	489	484	484
28.	7.	10	493	490	485	479	473
29.	7.	8	497	491	?	485	483
Anfang August Gefälle schwach oder fehlend (Trockenperiode), z. B.:							
3.	8.	8 Uhr	501	498	497	496	495
11.	8.	9	485	484	489	480	485
16.	8.	8	497	494	495	492	492
19.	8.	8	494	492	491	492	490
Ende August, 8 Uhr, bodenwärts noch CO_2-Anreicherung, z. B.:							
	8.	8 Uhr	497,8	500,9	501,9	502,8	504,0
September, 9 Uhr, bodenwärts CO_2-Verarmung faßbar:							
13.	9.	9 Uhr	493,7	491,6	491	490	488,2
17.	9.	9	495,3	495,8	495	491	489

Dieses bodenwärts gerichtete Tagesgefälle ist nicht nur — vorläufig in Meßbrückeneinheiten ausgedrückt — schwächer als das umgekehrte der Morgenstunden, sondern auch deswegen unsicherer, weil nun auch die Temperaturunterschiede in einzelnen Fällen etwas größer werden und vor der endgültigen Auswertung berücksichtigt werden müssen.

Der Gedanke, die Größe des Ausschlages nun einfach durch Ansaugen weiterer Luftmengen zu steigern (wir arbeiteten probeweise mit $^1/_{10}$ n Absorptionslauge und Durchleitung bis zu 60 Litern), erwies sich als sinnlos: Schon nach dem Durchleiten der zweiten sechs Liter macht sich bei der instabilen Temperaturschichtung der Tagesstunden vielfach eine Vermischung bemerkbar und verschiebt sich das Leitfähigkeitsverhältnis nicht oder wenigstens nur noch abgeschwächt weiter. Um hier noch weiter zu kommen, müßte man mit kontinuierlichen, aber ganz schwachen Luftströmen arbeiten; vielleicht könnte man die Ansaugstellen über ein längeres Rohr mit rechts und links angebrachten Löchern verteilen, das überdies so zwischen zwei waagerechte Platten verlegt ist, daß eine Ansaugung aus falschen Höhen erschwert ist.

Wenn schon in den frühen Vormittagsstunden zur Zeit des vormittägigen Assimilationsmaximum und bei noch schwacher Turbulenz das Kohlensäuregefälle mit unserer Methode nur in günstigen Fällen faßbar ist, nimmt es nicht wunder, daß das während der mittäglichen Assimilationsdämpfung und dem gleichzeitigen Austauschmaximum erst recht der Fall ist. Die trotzdem um 14 Uhr konsequent durchgeführte Gefällemessung ergab in 15 Fällen praktisch keine Verschiebung des Meßbrückenwertes (Endablesung innerhalb $\pm$ 3 Skalenteile von der Anfangsablesung), nur in je drei Fällen eine etwas größere Zu-, aber auch Abnahme. Entsprechendes gilt für die wenigen Stichproben um 18 Uhr. Die Angabe von Zahlenbelegen für diese Meßtermine erübrigt sich daher.

Um einen Anhaltspunkt für die solchen Meßbrückenverschiebungen entsprechenden CO_2-Gefälle zu geben, sei erwähnt, daß, wenn wir uns auch dem 500-Ohm-Vergleichswiderstand gegenüber in der Mitte der Meßbrücke befinden, ein Skalenteil 0,1 mg CO_2 entspricht. Die Morgenausschläge von meist 10—25 (maximal 36) Skalenteilen bei einer Durchleitung von insgesamt 21 Litern Luft von rund 0,6 mg Kohlensäuregehalt je Liter entsprechen dann einem bodenwärts ansteigenden Gefälle von 1 bis 2 (maximal 3) Prozent, während die Vormittagsausschläge im allgemeinen nur bei etwa fünf Skalenteilen gleich 0,5 % Gefälle (bodenwärts fallend) liegen.

Während sich solche Gefälle in der von uns oben überschlagenen Größenordnung bewegen, kommen sie für denjenigen überraschend, dem die vielmals größeren Ausschläge geläufig sind, welche Lundegårdh in seinem Buch „Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur" und in kurzer Zusammenfassung im Kapitel „Kohlensäure als Standortsfaktor" seines Buches „Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben" (in der mir vorliegenden 1. Auflage, S. 363) für die Abweichungen des CO_2-Gehaltes von Pflanzenbeständen gegenüber dem Freien angibt; bewegen sich diese doch für die beste Assimilationszeit (10—12 Uhr) zwischen — 46,7 und + 20 % für Feldkulturen, während für die Bodenflora der Wälder dank der lebhaften Bodenatmung bis + 154 % angegeben werden. Dabei handelt es sich um mittlere Abweichungen zahlreicher Versuchstage, wobei die Einzelwerte mehrfach noch im Verhältnis 1:3 streuen. Zum Verständnis solcher Unterschiede ist zunächst zu sagen, daß Lundegårdh nur in einem Fall ein unmittelbares Gefälle bestimmt hat, und zwar vom 21. Juli bis 2. August 1922 jeweils mittags 12 Uhr für die unteren und oberen Blätter eines Kartoffelfeldes

mit 0,748—0,550 mg/l = 26,5 %. In allen übrigen Fällen handelt es sich um den Unterschied in verschiedenen Pflanzenbeständen bestimmter CO_2-Gehalte gegenüber einem am Meere bestimmten „Standardwert". Das von Lundegårdh innerhalb seines Kartoffelfeldes bestimmte Gefälle ist mit dem vielmals kleineren, das wir über einem solchen gemessen haben, keineswegs unvereinbar, da ja die Gefälle im umgekehrten Verhältnis mit dem Austausch wechseln und dieser zwischen den Blättern rasch gegen Null absinkt. Wir können uns vielmehr denken, daß sich auch für Gefällemessungen über Beständen günstigere, im Austausch gebremste Muldenlagen finden lassen, bei welchen dafür freilich die Gefahr eines störenden Einflusses seitlicher Fremdluft besteht.

Übrigens gibt es noch eine andere Erscheinung, aus der man auf CO_2-Entzug oder -Zufuhr seitens der Vegetation schließen kann, nämlich den Tagesgang des CO_2-Gehaltes, der aus zahlreichen assimilationsökologischen Arbeiten bekannt ist und auch in unseren Messungen deutlich zutage trat:

Tabelle 10.

Tagesgang des CO_2-Gehaltes in 50 cm Höhe; Milligramm je Liter; die bei den Assimilationsbestimmungen an etwas anderer Stelle des Versuchsfeldes gefundenen Werte durch Kursivdruck von den bei der Gefällemessung bestimmten unterschieden.

Zeit	5–7	6–9	8–10	10—12	14—16	17–19
28. 7.— 2. 8.	0,69	*0,58*	0,56	*0,47*	0,46 *(0,46)*	(0,38)*)
3. 8.—17. 8.	0,57	*0,53*	0,53	*0,52*	0,52 *(0,51)*	0,57 *(0,56)*
18. 8.—31. 8.	0,66	*0,58*	0,59	*0,56*	0,51 *(0,55)*	0,49 *(0,52)*
1. 9.—17. 9.	0,72	*0,63*	0,57	*0,59*	0,53 *(0,57)*	0,71 *(0,56)*

*) Einzelwert.

Nach der mathematischen Behandlung, der Wilhelm Schmidt (1925, S. 12 und 20 ff.) und Lettau (34, S. 133 ff.) die aufwärts wandernde tägliche Temperaturwelle unterzogen haben, eröffnet sich die Aussicht, durch Integration entsprechender Differentialgleichungen auch die tägliche Zu- und Abnahme des CO_2-Gehaltes aus dem in mehreren Höhen ermittelten Tagesgang zu berechnen. Die Aufgabe ist allerdings nicht einfach, nachdem sich die von W. Schmidt zur Vereinfachung zunächst gewagte Vernachlässigung sowohl der räumlichen wie der zeitlichen Schwankungen des Austausches als untragbar erwiesen hat. Lettau ist durch Einführung der „Halbwerthöhe Z"

in welcher die Tagesamplitude auf die Hälfte sinkt, von der Höhenabhängigkeit des Austausches im einzelnen unabhängig geworden, aber „eine vollständige Theorie, welche außer der Höhenabhängigkeit des Austauschkoeffizienten noch seinen periodischen zeitlichen Gang berücksichtigt, liegt noch nicht vor" (Lettau, S. 141). Wir müssen uns mit diesen Andeutungen begnügen und erwähnen nur noch, daß die Halbwertshöhe bei durchschnittlicher atmosphärischer Turbulenz in der Größenordnung von 100 Meter liegt, weil sich daraus ein Anhaltspunkt für die Mächtigkeit der die Gehaltsschwankungen aufnehmenden Schicht ergibt.

Natürlich kann aus der Tagesamplitude der Kohlensäurestrom nur für ein wesentlich ausgedehnteres Gebiet ermittelt werden als aus einzelnen Gefällemessungen, weshalb ich für die Pflanzenökologie den Ausbau der letzteren für wichtiger halte. Für größere einheitliche Vegetationsgebiete, z. B. Wälder, ist aber auch die Verfolgung der Tagesamplituden aussichtsreich, wobei die vielfach vorhandenen, über den Bestand herausragenden Feuerwachtürme als Stützpunkte dienen können.

Zum Schlusse sei noch daran erinnert, daß der Vegetationsschicht außer dem aus der Atmosphäre absteigenden Kohlensäurestrom noch der aufsteigende der Bodenatmung zufließt, der nach Lundegårdhs eingehenden Untersuchungen auf gedüngten Feldern, aber auch auf humösen Waldböden einen erheblichen Teil des Assimilationsbedarfes decken kann. Dieser Betrag der Bodenatmung müßte mit Hilfe der hiefür gut durchgearbeiteten Methoden gesondert bestimmt und der Größe des CO_2-Stromes aus der Luft zugeschlagen werden, wenn wir die gesamte Kohlensäurebindung der Grünvegetation als Produktionsmaß erfassen und nicht nur die Bruttobilanz Boden + Vegetation gegen freie Luft bestimmen wollen.

Rückblick

Die vorstehend mitgeteilten Versuche, den Gasaustausch über Pflanzenbeständen zu messen, bewegen sich für die Botanik auf fast völligem Neuland; sie mußten außerdem infolge des Krieges in vielem mit behelfsmäßiger Methodik sowie in

einem hiefür wenig geeigneten Gelände durchgeführt werden. Trotzdem geben sie über die Größenordnung und vielfach auch bereits die Variation aller beteiligten Faktoren und damit die erforderliche Genauigkeit der einzusetzenden Apparaturen Aufschluß.

Fast auf jedem Teilgebiete konnten Ansatzpunkte für eine aussichtsreiche Weiterarbeit gewonnen werden: Bei der Messung des Feuchtigkeitsgefälles wird die Registrierung mit verbesserten Thermoelement-Psychrometern die dauernde Wartung erfordernde Wägung der Chlorkalziumrohre verdrängen, die Windmessung als Grundlage der Austauschberechnung tunlichst auf Hitzdraht-Anemometer umgestellt und gleichfalls registrierend eingerichtet werden müssen; die Messung des schwachen Kohlensäuregefälles verlangt äußerste Steigerung der Meßgenauigkeiten, sei es auf dem eingeschlagenen Weg der vergleichenden Leitfähigkeitsbestimmung oder auch neuen Wegen (Hitzdrahtregistrierung nach Harder und Aufdemgarten?).

Zum Schlusse sei noch einmal das Ziel dieser Arbeit hervorgehoben: So wie sich das öffentliche Interesse vom Individuum verstärkt den Gesetzen der Gesellschaft zugewendet hat, wie in der Systematik neben der Kenntnis der Einzelpflanze die Erforschung der Pflanzengesellschaften aufgeblüht ist, so besteht auch in der experimentellen Ökologie schon seit Jahren das Bedürfnis, die Autökologie der Einzelpflanze durch eine Synökologie der Bestände zu erweitern. Es gab aber, abgesehen von den Vorstößen, die Filzer als einsamer Pionier in dieses Gebiet unternommen hat, noch kaum eine Methode, die verfeinerte Einblicke in die physiologischen Vorgänge der Pflanzengesellschaften ermöglichte; denn der große Erfahrungsschatz der land- und forstwirtschaftlichen Ertragskunde, dessen theoretische Auswertung erst in jüngster Zeit von Walter und Filzer in Angriff genommen wurde, beschäftigt sich ja nur mit dem Endergebnis, nicht aber dem Zustandekommen der pflanzlichen Produktion. Die in der vorliegenden Untersuchung angebahnte Messung des Wasserdampf- und Kohlensäureaustausches verspricht nun, die beiden grundlegendsten Stoffwechselvorgänge des Bestandes laufend zu erfassen.

Dadurch, daß der Gasstrom ohne nennenswert störenden Eingriff über dem Bestande erfaßt wird, kommt das Verfahren dem Ideal ökologischer Untersuchungen besonders nahe: kein Zweig braucht entnommen, kein Blatt einem unnatürlichen Küvettenklima ausgesetzt werden. Besonders eine genügend genaue Messung des Kohlensäurestromes würde die ökologische Assimilationsforschung von zahlreichen bisher unvermeidlichen Widernatürlichkeiten befreien, die der Einfluß der Versuchszweige in Küvetten mit ihren völlig veränderten Wärme-, Feuchtigkeits- und Belüftungsbedingüngen mit sich brachte. Ich darf angesichts eines so hohen Zieles wohl der Überzeugung und Hoffnung Ausdruck geben, daß die bescheidenen Anfänge des hier eingeschlagenen Weges mich und andere in friedlichen Zeiten zu neuen, vertieften Einblicken in den Stoffaustausch der Pflanzengesellschaften weiterführen werden.

Zusammenfassung.

1. Die Größe eines vertikalen Gasstromes ergibt sich nach Wilh. Schmidt als Produkt aus Gefälle und Austausch. Um auf dieser Grundlage die Größe des Wasserdampf- und Kohlendioxydstromes über Pflanzenbeständen zu messen, liefen nach verschiedenen Vorversuchen von Juli bis September 1943 über einem Kartoffelfeld des Tharandter Forstgartens Messungen des Wasserdampf- und CO_2-Gefälles sowie des Austausches mit vorhandenen und daher in manchem nur behelfsmäßigen Apparaturen.

2. Die gravimetrische Bestimmung des Wasserdampfgefälles erfolgte durch Absorption mittels Chlorkalzium in 50 und 150 cm Höhe, wobei tagsüber Unterschiede um etwa 10% vorherrschen. Bei warm-trockenem Wetter erwies sich die Absorption des Chlorkalziums als unzureichend; außerdem ist bei starker Temperaturschichtung eine Korrektur für die unterschiedliche Luftdichte erforderlich.

3. Es wurde daher außerdem eine psychrometrische Feuchtigkeitsregistrierung mit Thermoelement-Psychrometern versucht. Vor endgültiger Anwendung dieser sehr

eleganten Methode muß der Fehler einer systematisch verschiedenen Belüftung des oberen und unteren Thermoelements durch rechnerische Reduktion oder Anwendung genügend feiner (und damit belüftungsunabhängiger) Thermometerkörper ausgeschaltet werden.

4. Der Austauschkoeffizient konnte in Ermangelung von Hitzdraht-Anemometern vorläufig nur aus den Ablesungen von in beiden Meßhöhen laufenden Schalenkreuzanemometern berechnet werden. Da diese bei geringen Windgeschwindigkeiten nicht ansprechen, lassen sich nur die Aufzeichnungen bei einigermaßen lebhafter Turbulenz auswerten. Als Produkt aus Wasserdampfgefälle und Austausch ergeben sich dann Wasserdampfströme der erwarteten Größenordnung (tagsüber 0,1—1 Millimeter Verdunstung je Stunde).

5. Das CO_2-Gefälle muß in dem Maße schwächer sein als das Wasserdampfgefälle, wie die Assimilation schwächer ist als die Transpiration. Die darnach zu erwartenden CO_2-Gefälle der Größenordnung um 1 % je Meter konnten nur nach höchster Verfeinerung der Meßtechnik in den Morgen- (Anreicherung von Atmungskohlensäure) und Vormittagsstunden (CO_2-Verarmung in der Vegetationsschicht) eindeutig erfaßt werden, während sie zur Zeit der Mittagsturbulenz praktisch verschwinden.

6. Die Untersuchungen verdienen in Friedenszeiten mit einem den gewonnenen Erkenntnissen Rechnung tragenden verbesserten Instrumentarium wieder aufgenommen zu werden, weil sie ohne störenden Eingriff eine laufende Messung des Transpirations- und Assimilationshaushaltes von Pflanzenbeständen versprechen und damit wichtige Beiträge zu einer experimentellen Synökologie liefern könnten.

Schrifttums-Verzeichnis

Aufdemgarten, H., Zur Kenntnis der sogenannten Induktionsvorgänge bei der Kohlensäureassimilation (Diss. Göttingen). Planta **29**, 1939, 643.

Filzer, P., Experimentelle Beiträge zur Synökologie der Pflanzen I. Jb. f. wiss. Bot. **79**, 1933, 9.

Friedmann, Chr., Die konduktometrische Titration bei der Assimilationsbestimmung. Z. f. Bot. **26**, 1933, 285.

Geiger, R., Das Klima der bodennahen Luftschicht. 2. Aufl., Braunschweig 1942.
Harder, R., und Aufdemgarten, H., Über den Verlauf der Photosynthese nach voraufgegangener Verdunklung (Versuche mit dem Gaswechselschreiber). Nachr. Ges. d. Wiss. Göttingen, N. F. Fachgr. VI, Bd. 3, Nr. 10, 1938, S. 191.
Hellmann, G., Aspirations-Psychrometertafeln. Herausg. v. d. Preuß. Meteorol. Inst., 2. Aufl., Braunschweig 1914.
Holdheide, W., Huber, B., und Stocker, O. Eine Feldmethode zur Bestimmung der momentanen Assimilationsgröße von Landpflanzen. Ber. d. dtsch. bot. Ges. **54**, 1936, 168.
Huber, B., Zur Methodik der Transpirationsbestimmung am Standort. Ebenda **45**, 1927, 611.
— Methoden, Ergebnisse und Probleme der neueren Baumphysiologie. Ebenda **55**, 1937, (46).
— Mikroklimatische und Pflanzentemperatur-Registrierungen mit dem Multithermographen von Hartmann & Braun. Jb. f. wiss. Bot. **84**, 1937, 671.
— Wasserumsatz und Stoffbewegungen. Fortschr. d. Bot. **11**, 1944, 146.
Kleinschmidt, E., Handbuch der meteorol. Instrumente. Berlin 1935.
Lettau, H., Atmosphärische Turbulenz. Leipzig 1939.
Lundegårdh, H., Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur. Jena 1924.
— Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben. Jena 1925.
Paeschke, W., Experimentelle Untersuchungen zum Rauhigkeits- und Stabilitätsproblem in der bodennahen Luftschicht. Diss. Göttingen 1937.
Pisek, A., und Cartellieri, E., Der Wasserverbrauch einiger Pflanzenvereine. Jb. f. wiss. Bot. **90**, 1941, 255.
Prandtl, L., Führer durch die Strömungslehre. 2. Auflage. Braunschweig 1944.
Rossi, V., Über mikroklimatologische Temperatur- und Feuchtigkeitsbeobachtungen mit Thermoelement-Psychrometern. Soc. Scient. Fenn. Comm. Physico-Mathem. **VI/25**, 1933.
Schmidt, W., Der Massenaustausch bei der ungeordneten Strömung in freier Luft und seine Folgen. Sitzber. Wr. Akad. IIa **126**, 1917, 757.
— Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probl. d. kosm. Physik **7**, 1925.
Stocker, O., Experimentelle Ökologie der Pflanzen. Tab. Biol. **5**, 1929, 510.
Stocker, O., Rehm, S., und Paetzold, I., Beiträge zur Methodik der kurzfristigen Assimilationsmessung. Jb. f. wiss. Bot. **86**, 1938, 556.
Thornthwaite, C. W., and Holzman, B., The determination of evaporation from land and water surfaces (Soil Conservation Service, Washington). Monthly Weather Review **67**, 1939, 4—11. (Ob die weiteren dort angekündigten Arbeiten erschienen sind, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden.)
Wald, H. E., Psychrometer ohne künstliche Belüftung. Z. f. d. ges. Kälte-Industrie **39**, 1932, 111.
Walter, H., Produktivität der Pflanzendecke und Mitscherlichs Ertragskurve. Ber. d. dtsch. bot. Ges. **59**, 1941, 114.